https://doi.org/10.15388/vu.thesis.495
https://orcid.org/0000-0001-7517-4767

VILNIAUS UNIVERSITETAS
VMTI FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Kirill Skovorodko

Dozimetrų ir kalibruotų jonizacinių kamerų taikymas optimizuojant apšvitą branduolinės medicinos procedūrose

DAKTARO DISERTACIJA

Gamtos mokslai,
Fizika (N 002)

VILNIUS 2023

Disertacija rengta 2017–2022 metais VMTI Fizinių ir technologijos mokslų centre.

Mokslinis vadovas – dr. Arūnas Gudelis (VMTI Fizinių ir technologijos mokslų centras, gamtos mokslai, fizika, N 002).

Gynimo taryba:
Pirmininkas – prof. dr. Vincas Tamošiūnas (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, fizika, N 002).
Nariai:
Prof. dr. Saulius Bagdonas (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, fizika, N 002),
Dr. Evaldas Maceika (VMTI Fizinių ir technologijos mokslų centras, gamtos mokslai, fizika, N 002),
Prof. dr. Liutauras Marcinauskas (Kauno technologijos universitetas, gamtos mokslai, fizika, N 002),
Habil. dr. Danas Ridikas (Tarptautinė atominės energijos agentūra, Austrija, gamtos mokslai, fizika, N 002).

Disertacija ginama viešame Gynimo tarybos posėdyje 2023 m. rugsėjo mėn. 7 d. 11 val. FTMC Fizinių ir technologijos mokslų centre, Fizikos instituto posėdžių salėje. Adresas: Savanorių pr. 231, Vilnius, Lietuva, tel. +370 5 266 1640/1643; el. paštas: office@ftmc.lt.

Disertaciją galima peržiūrėti Fizinių ir technologijos mokslų centro, Vilniaus universiteto bibliotekose ir VU interneto svetainėje adresu: *https://www.vu.lt/naujienos/ivykiu-kalendorius*

https://doi.org/10.15388/vu.thesis.495
https://orcid.org/0000-0001-7517-4767

VILNIUS UNIVERSITY
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

Kirill Skovorodko

Application of Dosimeters and Calibrated Ionization Chambers in Optimization of Exposure in Nuclear Medicine Procedures

DOCTORAL DISSERTATION

Natural sciences,
Physics (N 002)

VILNIUS 2023

The dissertation was prepared between 2017 and 2022 at the Center for Physical Sciences and Technology.

Academic supervisor – Dr. Arūnas Gudelis (Center for Physical Sciences and Technology, natural sciences, physics, N 002)

Dissertation Defence Panel:

Chairman – Prof. Dr. Vincas Tamošiūnas (Vilnius University, Natural Sciences, Physics, N 002).
Members:
Prof. Dr. Saulius Bagdonas (Vilnius University, Natural Sciences, Physics, N 002),
Dr. Evaldas Maceika (Center for Physical Sciences and Technology, Natural Sciences, Physics, N 002),
Prof. Dr. Liutauras Marcinauskas (Kaunas University of Technology, Natural Sciences, Physics, N 002),
Habil. Dr. Danas Ridikas (International Atomic Energy Agency, Austria, Natural Sciences, Physics, N 002).

The dissertation shall be defended at a public meeting of the Dissertation Defence Panel at 11.00 on 7th Septemebr 2023 in the meeting room of the Institute of Physics, Center for Physical Sciences and Technology.
Address: Savanorių ave. 231, Vilnius, Lithuania
Tel. +370 5 266 1640/1643; e-mail: office@ftmc.lt

The text of this dissertation can be accessed at the libraries of Center for Physical Sciences and Technology as well as on the website of Vilnius University:
www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius

SANTRUMPOS

AAPM – Amerikos medicinos fizikų asociacija
ASPĮ – asmens sveikatos priežiūros įstaiga
BEIR VII – biologinio jonizuojančiosios spinduliuotės poveikio modelis
BIPM – Tarptautinis svorių ir matų biuras
BM – branduolinė medicina
CIEMAT/NIST – radionuklidų standartizavimo metodas, sukurtas Ispanijos ir JAV mokslininkų
CZT – kadmio cinko telūrido detektoriai
DAL – diagnostiniai atskaitos lygiai (angl.– DRL Diagnostic reference levels)
EANM – Europos branduolinės medicinos asociacija (angl. European Association of Nuclear Medicine)
EURAMET – Europos nacionalinių metrologijos institutų asociacija
EPD – elektroninis personalinis dozimetras
FTMC – Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras
HN – higienos norma
Hp – individualiosios dozės ekvivalentas
ICRP – Tarptautinė radiologinės saugos komisija (angl. International Commission on Radiological Protection)
JS – jonizuojančioji spinduliuotė
JSŠ – jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinis
JSML – Jonizuojančiosios spinduliuotės metrologijos laboratorija
k = – išplėstinės neapibrėžties koeficientas
KT – kompiuterinė tomografija
KK – kokybės kontrolė
LTAC – tiesioginio laiko sutapimų skaitikliai (angl. live-timed anticoincidence counters)
MATV – metaboliškai aktyvių navikų tūris
MDP – metilendifosfonatas
MRT – magnetinio rezonanso tomografija
NaI(Tl) – natrio jodido kristalas su talio priemaišomis
NDAL – nacionaliniai diagnostiniai atskaitos lygiai
NPL – Nacionalinė fizikos laboratorija (Jungtinė Karalystė)
OSL – optiškai stimuliuotos liuminescencijos dozimetras
PET – pozitronų emisijos tomografijos įranga
RSC – Radiacinės saugos centras

SPECT – vieno (pavienių) fotono (-ų) emisijos tomografijos įranga
STS – signalo ir triukšmo santykis
TATENA – Tarptautinė atominės energijos agentūra (angl. International Atomic Energy Agency (IAEA))
TDCR – radionuklidų standartizavimo metodas (trigubų ir dvigubų sutapčių santykio skaitiklis)
TLD – termoliuminescencinė dozimetrija
TLG – viso naviko glikolizė
VULSK – Vilniaus universiteto ligoninė Santaros klinikos
„Molibdeno (^{99}Mo) skilimo testas“– kokybės kontrolės metodas, skirtas patikrinti molibdeno kiekį ^{99m}Tc eliuate
^{18}F-FDG – fluorodeoksigliukozė
^{99m}Tc – metastabilusis technecis-99

TURINYS

ĮVADAS 10

1. BRANDUOLINĖJE MEDICINOJE NAUDOJAMŲ METODŲ, ĮRANGOS IR PREPARATŲ APŽVALGA BEI METROLOGIJOS SVARBA JŲ TAIKYMUI 15

1.1. Radiacinė sauga branduolinėje medicinoje 15

1.2. Pagrindiniai veiksniai, lemiantys branduolinės medicinos tyrimų atlikimo kokybę 16

1.3. Branduolinės medicinos įranga ir radiofarmaciniai preparatai 17

1.3.1. Naudojama įranga 17

1.3.2. Medicinoje dažniausiai naudojami radionuklidai 17

1.3.3. Fizinės naudojamų radiofarmacinių medžiagų charakteristikos 18

1.3.4. Branduolinės medicinos įrangos kalibravimas 19

1.4. Metrologija ir radionuklidų aktyvumo matavimo technologijos, taikomos branduolinėje medicinoje 19

1.4.1. Pirminiai ir antriniai metodai 20

1.4.1.1. Blyksninių tirpalų spektrometrija 20

1.4.1.2. TDCR 21

1.4.1.3. Jonizacinės kameros su šuliniu 21

1.4.1.4. Gama spektroskopija 24

1.5. Kiti jonizuojančiosios spinduliuotės matavimo prietaisai ir metodai, taikomi ir naudojami branduolinėje medicinoje 24

1.6. Skyriaus apibendrinimas 25

2. RADIOFARMACINIŲ PREPARATŲ AKTYVUMO MATUOKLIŲ PALYGINAMIEJI MATAVIMAI IR RADIOFARMACINIŲ PREPARATŲ NUKLIDINIO GRYNUMO NUSTATYMAS 26

2.1. Branduolinėje medicinoje naudojamų radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių palyginamųjų matavimų rezultatai 27

2.2. Branduolinėje medicinoje naudojamų radiofarmacinių preparatų nuklidinio ir radiocheminio grynumo rezultatai 29

2.3. Radiofarmacinių junginių radiocheminis grynumas 29

2.3.1. Radiofarmacinių preparatų nuklidinio grynumo rezultatai 30
2.4. Skyriaus apibendrinimas 30
3. JONIZUOJANČIOSIOS SPINDULIUOTĖS POVEIKIO VERTINIMAS BRANDUOLINĖS MEDICINOS DARBUOTOJAMS 31
3.1. Epidemiologiniai tyrimai ir JS poveikio efektų rizikos vertinimas 31
3.2. Skydliaukės vėžio ir leukemijos rizikos vertinimas ir rezultatai, panaudojant BEIR VII modelį 32
3.3. Skyriaus apibendrinimas 33
4. BRANDUOLINĖS MEDICINOS DARBUOTOJŲ PATIRIAMOS VISO KŪNO Hp(10) IR RANKŲ Hp(0,07) APŠVITOS ĮVERTINIMAS . 34
4.1. Profesinės apšvitos vertinimas 34
4.2. Branduolinės medicinos darbuotojų Hp(10) apšvitos problematika .. 35
4.3. Branduolinės medicinos darbuotojų Hp(10) apšvitos vertinimų rezultatai 36
4.4. Branduolinės medicinos darbuotojų Hp(0,07) apšvitos problematika 38
4.5. Branduolinės medicinos darbuotojų Hp(0,07) apšvitos vertinimų rezultatai 39
4.6. Skyriaus apibendrinimas 41
5. PACIENTŲ RADIACINĖ SAUGA IR FAKTORIAI, LEMIANTYS SULEIDŽIAMO AKTYVUMO TIKSLUMĄ 43
5.1. Diagnostiniai atskaitos lygiai branduolinėje medicinoje 43
5.2. Lietuvos ASPĮ pacientams skiriamų radiofamacinių preparatų aktyvumo analizė 44
5.3. Diagnostinių protokolų optimizavimas ir vaizdų kvantifikavimas 46
5.3.1. Kaulų scintigrafijos prokolo optimizavimas 46
5.3.2. Miokardo perfuzijos scintigrafijos protokolų optimizavimas 48
5.4. Skenavimo įrangos kalibraciniai patikrinimai ir kokybės kontrolės harmonizavimas 50
5.5. Skyriaus apibendrinimas 50
REZULTATŲ SANTRAUKA 52
IŠVADOS 53
NUMATOMA 54

SUMMARY 56
Introduction 57
Materials and Methods 59
1.1. Calibration of nuclear medicine equipment 59
1.2. Primary and secondary methods 60
2.1. Results of comparison measurements of radiopharmaceutical activity meters used in nuclear medicine 61
2.2. Radiochemical and radionuclide purity of radiopharmaceutical 62
3. Assessment of ionizing radiation exposure to nuclear medicine workers and cancer risk assessment 63
4. Assessment of whole body Hp(10) and hand Hp(0.07) exposure to nuclear medicine workers 64
4.1. Results of Hp(10) exposure of nuclear medicine workers 64
4.2. Results of Hp(0.07) exposure of nuclear medicine workers 65
5. Radiation safety of patients and factors determining accuracy of injected activity 66
5.1. Results of an analysis of the activity prescribed to the patients 66
5.2. Optimization of diagnostic protocols, quantification of images and calibration checks 67
Conclusions 68
PADĖKA 69
PUBLIKACIJŲ IR KONFERENCIJŲ SĄRAŠAS 79
GYVENIMO APRAŠYMAS 83
ABOUT THE AUTHOR 83
PUBLIKACIJŲ KOPIJOS 84
UŽRAŠAMS 139

ĮVADAS

Lietuvoje, kaip ir visame pasaulyje, kiekvienais metais daugėja medicininėje radiologijoje naudojamos įrangos kiekis, taip pat auga medicininių procedūrų atliekamas kiekis [1, 2]. Tai sukuria žmonių populiacijos medicininės apšvitos didėjimą, todėl ypatingas dėmesys turi būti skiriamas branduolinei medicinai. Remiantis World Nuclear Association 2018 m. paskelbtais duomenimis, pasaulyje atliekama daugiau nei 40 mln. branduolinės medicinos procedūrų, ir šis skaičius auga 5 % kasmet [3].

Branduolinė medicina – tai medicinos ir mokslo sritis, kurioje įvairūs radiofarmaciniai preparatai naudojami ligų diagnostikai, gydymui ir ligos gydymo atsako stebėjimui bei biomedicininiams tyrimams atlikti. Branduolinė medicina jungia skirtingas mokymosi disciplinas ir mokslo šakas, tokias kaip fizika, biologija, matematika, informacinės technologijos, chemija, medicina ir kt. Dažniausiai branduolinės medicinos diagnostiniai tyrimai parodo organizmo funkcinius, metabolinius, dinaminius procesus ir susirgimus bei ligos gydymo atsako stebėjimą. Branduolinės medicinos procedūrų atlikimą reglamentuoja Lietuvos higienos normos, tarptautinės ir vietinės rekomendacijos, kitos gairės, todėl naudojamos įrangos tikslumas, pacientų ir darbuotojų apšvitos klausimai bei radiacinė sauga tampa vis svarbesniu uždaviniu vykdant tokio pobūdžio veiklą, ypač diegiant naujas technologijas, taikant skirtingus radiofarmacinius preparatus ir atliekant naujas procedūras.

Pacientams skiriamų radiofarmacinių preparatų aktyvumo tikslumas, skenavimo įrangos kalibravimas ir patikra priklauso nuo rutininių kokybės kontrolės matavimų, periodinių patikrinimų naudojant kalibracinius šaltinius ir palyginimo su antrinio etalono įranga. Nuo naudojamos įrangos tinkamo veikimo taip pat priklauso pacientų ir darbuotojų radiacinė sauga.

Pagal Lietuvoje galiojančias higienos normas HN 77:2015 „Radiacinė sauga branduolinėje medicinoje“ ir HN 73:2018 „Pagrindinės radiacinės saugos normos“, profesinės apšvitos vertinimas branduolinės medicinos darbuotojams yra nuolatinis ir privalomas procesas, taip pat turi būti panaudotos apšvitos mažinimo priemonės, organizacinės priemonės optimizuojant radiacinę saugą, turi būti vykdoma darbuotojų apšvitos stebėsena, užtikrinta pacientų ar gyventojų radiacinė sauga [4, 5].

Šiame darbe nagrinėjami radiacinės saugos principai ir metodai, taikomi branduolinėje medicinoje, taip pat nagrinėjami metrologijos metodai ir kiti parametrai bei faktoriai, turintys įtaką įrangos tikslumui bei pacientų ir darbuotojų JS apšvitos poveikiui.

Branduolinėje medicinoje naudojamų aktyvumo kalibratorių ir kitos įrangos rodmenys bei parametrai yra svarbūs vertinant diagnostinius vaizdus, kiekybiškai nustatant radiofarmacinio preparato susikaupimą paciento organizme, todėl sklandus ir tikslus įrangos veikimas yra būtina sąlyga užtikrinant pacientų ir darbuotojų radiacinę saugą [4-7].

Pirmame etape, siekiant įvertinti Lietuvos ligoninėse naudojamų aktyvumo kalibratorių tikslumą, buvo atlikti palyginamieji matavimai, jų metu kalibratorių atsakas lygintas su antrinio dozės kalibratoriaus Capintec CRC-15R (kilnojamoji 4π γ jonizacinė kamera) atsaku. Kilnojamoji jonizacinė kamera susieta su stacionariąja jonizacine kamera Fidelis, jos abi palyginimų būdu susietos su Čekijos Nacionalinio metrologijos instituto etalonu ir yra Lietuvos nacionalinio radionuklidų aktyvumo vieneto etalono dalis didelio aktyvumo srityje. Palyginamųjų matavimų metu buvo nustatyta matavimo neapibrėžtis priklausomai nuo radionuklido ir matavimo geometrijos.

Antrame etape dėmesys buvo sutelktas į pacientų ir darbuotojų radiacinę saugą. Pirmame etape atlikti matavimai leido sėkmingai vykdyti tyrimus, susijusius su branduolinės medicinos darbuotojų patiriama apšvita ir pacientų gaunama apšvita procedūrų metu.

Taip pat šiame darbe nagrinėjama jonizuojančiosios spinduliuotės keliama rizika sveikatai, dirbant branduolinėje medicinoje su atviraisiais ir uždaraisiais radioizotopiniais šaltiniais bei radiofarmacinėmis medžiagomis.

Disertacijos rengimo metu dalyvauta rengiant Europos medicinos fizikos organizacijų federacijos gaires dėl PET/KT ir PET/MRT skenavimo įrangos kokybės kontrolės atlikimo [8]. Šios gairės apibrėžia naujoviškos skenavimo įrangos kokybės kontrolės parametrus bei nagrinėja veiksnius, svarbius užtikrinant matavimo priemonių sietį, naudojant sertifikuotus JSŠ ir taikant patvirtintus metodus.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Tikslas – nustatyti ir įvertinti radiacinei saugai svarbius parametrus ir faktorius, susijusius su branduolinėje medicinoje taikomais metrologijos metodais.

Tikslui pasiekti suformuluoti šie uždaviniai:

1. Ištirti ir įvertinti Lietuvos sveikatos priežiūros specialistų, dirbančių branduolinėje medicinoje, susirgimų rizikas.

2. Atlikti Lietuvos ASPĮ branduolinės medicinos skyriuose naudojamų radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių palyginamuosius matavimus ir įvertinti aktyvumo matuoklių rodmenų poslinkį.

3. Įvertinti branduolinės medicinos darbuotojų patiriamą viso kūno individualiosios dozės ekvivalento Hp(10) apšvitą, suleidžiant ^{18}F-FDG radiofarmacinius preparatus automatiniais injektoriais.

4 Atlikti branduolinės medicinos darbuotojų gaunamos rankų individualiosios dozės ekvivalento Hp(0,07) apšvitos, dirbant su ^{99m}Tc ir ^{18}F radionuklidais, analizę.

5. Atlikti Lietuvos ASPĮ pacientams branduolinės medicinos diagnostinių procedūrų metu skiriamo radionuklidų aktyvumo analizę ir pasiūlyti bei atnaujinti branduolinėje medicinoje taikomus vietinius diagnostinius atskaitos lygius, atsižvelgiant į aktualų paskirtą ir suleistą radiofarmacinio preparato aktyvumą.

Asmeninis indėlis

Disertacija rengta 2017–2022 m. Fizinių ir technologijos mokslų centre (FTMC) ir Vilniaus universiteto ligoninėje Santaros klinikose (VULSK).

Moksliniai straipsniai rengti kolektyviai kartu su vadovu ir kolegomis iš skirtingų įstaigų. Autoriaus indėlis yra esminis atliekant detalų branduolinės medicinos darbuotojų ir pacientų apšvitos vertinimą, taip pat rengiant straipsnius, vykdant eksperimentinę dalį, renkant duomenis ir interpretuojant tyrimų rezultatus, taip pat formuluojant išvadas ir rekomendacijas. Publikuotuose straipsniuose, kuriuose disertacijos autorius nėra pirmas autorius, asmeninis indėlis buvo: tyrimų idėjų sukūrimas, duomenų rinkimas ir apdorojimas, duomenų analizė ir jų interpretavimas, atskirų straipsnio dalių rašymas ir korekcijos.

Darbo naujumas ir praktinė darbo reikšmė

Šio darbo metu pirmą kartą buvo įvertintas visų naudojamų ASPĮ radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių tikslumas. Taip pat pirmą kartą buvo įvertinta Lietuvos sveikatos priežiūros specialistų, dirbančių branduolinėje medicinoje, onkologinių ir kitų susirgimų rizikos tikimybė, atsižvelgiant į Valstybės jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinių ir apšvitą patiriančių darbuotojų registro aktualius duomenis. Pateikiami nauji ir aktualūs duomenys apie ASPĮ pacientams skiriamo radiofarmacinių preparatų aktyvumo vertes. Taip pat buvo atnaujinti keturių dažniausiai Lietuvoje atliekamų BM procedūrų diagnostiniai atskaitos lygiai. Vertinant branduolinės medicinos darbuotojų patiriamą apšvitą buvo surinkti ir apibendrinti svarbūs duomenys apie personalo patiriamą apšvitą nuo jonizuojančiosios spinduliuotės, dirbant su moderniais ekranuotais

automatiniais radiofarmacinių preparatų injekavimo prietaisais. Gauti nauji koeficientai, vertinant darbuotojų rankų apšvitą dirbant su ^{18}F-FDG radiofarmaciniais preparatais. Išvados svarbios tiek praktiniu požiūriu vertinant darbuotojų patiriamą apšvitą, galimas rizikas sveikatai, vertinant pacientų apšvitą, tiek moksliniu požiūriu, kaip vertinga pagalbinė medžiaga atliekant apšvitos optimizavimo darbus. Kartu su kitais specialistais parengtos naujos PET/KT ir PET/MRT skenavimo įrangos kokybės kontrolės atlikimo gairės.

Disertacijos išdėstymas

Disertaciją sudaro penkios dalys, aprašančios nuveiktus darbus, paskelbtus pranešimus ir publikuotus mokslinius straipsnius. Pirma dalis – literatūros apžvalga apie branduolinę mediciną ir procesus, besisiejančius su metrologija, taikomus metodus ir priemones, užtikrinančias sklandų veikimą. Antra dalis skirta apžvelgti radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių tikslumo ir radiofarmacinių preparatų radionuklidinio grynumo nustatymo aspektus. Trečia dalis aprašo profesinės veiklos metu patiriamos jonizuojančiosios spinduliuotės įtaką branduolinės medicinos darbuotojams: poveikį jų sveikatai, rizikos vertinimą, aptariami epidemiologiniai tyrimai. Ketvirtoje dalyje nagrinėjamos branduolinės medicinos darbuotojų patiriamos viso kūno Hp(10) ir rankų Hp(0,07) apšvitos dozės ir problematika, susijusi su rezultatų gavimu ir vertinimu. Penktoje dalyje pristatoma pacientų radiacinė sauga ir nagrinėjami veiksniai, lemiantys skiriamo radiofarmacinio preparato aktyvumo pacientams tikslumą bei diagnostinės įrangos kokybės kontrolės kriterijai ir problematika. Kiekvienos dalies pabaigoje pateiktas trumpas skyriaus apibendrinimas.

Darbo naujumas

1. Pirmą kartą buvo įvertintas ir išanalizuotas visų Lietuvoje naudojamų ASPĮ radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių ilgalaikis rodmenų poslinkis ir nustatyta matavimų neapibrėžtis.
2. Ištirta ir įvertinta Lietuvos sveikatos priežiūros specialistų, dirbančių branduolinėje medicinoje, skydliaukės navikinių susirgimų ir leukemijos rizika.
3. Pirmą kartą Lietuvoje buvo įvertinti atskaitos lygiai atsižvelgiant į realią skiriamą pacientams dozuotę (suleistą radiofarmacinių preparatų aktyvumą).
4. Pasiūlytas naujas branduolinės medicinos darbuotojų patiriamos rankų apšvitos Hp(0,07) koeficientas pirštų galiukams.

Ginamieji teiginiai

1. Prognozuojama Lietuvos branduolinės medicinos darbuotojų apšvitos lemta rizika susirgti skydliaukės vėžiu ar leukemija per gyvenimą yra maža: ~10^{-5}. Darbuotojų moterų skydliaukės vėžio rizika iki 5,7 karto didesnė nei vyrų.
2. Lietuvos BM skyriuose naudojamų radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių įvertintas tikslumas yra nevienodas: nustatytas poslinkis siekia 9 % kalibraciniams, 18 % diagnostiniams ir 20 % terapiniams šaltiniams.
3. BM darbuotojų, rankiniu būdu suleidžiant ^{99m}Tc preparatus bei automatiniais injektoriais suleidžiant ^{18}F-FDG, pirštų galiukai gauna 1,3–2,4 karto didesnę Hp(0,07) dozę, palyginus su dozėmis, fiksuojamomis įprastoje rankų Hp(0,07) dozimetro nešiojimo vietoje. Dirbant su automatiniais injektoriais ir suleidžiant ^{18}F-FDG vienam pacientui, darbuotojų Hp(10) apšvita siekia 2,24 μSv.
4. Pasiūlyti keturi branduolinėje medicinoje taikomi diagnostiniai atskaitos lygiai, atsižvelgiant į aktualų paskirtą ir suleistą radiofarmacinio preparato aktyvumą ir naudojamą skenavimo įrangą.
5. Optimizuoti ir harmonizuoti diagnostiniai miokardo perfuzijos ir kaulų scintigrafijos protokolai CZT SPECT skenavimo įrangos taikymui klinikinėje praktikoje.

1. BRANDUOLINĖJE MEDICINOJE NAUDOJAMŲ METODŲ, ĮRANGOS IR PREPARATŲ APŽVALGA BEI METROLOGIJOS SVARBA JŲ TAIKYMUI

Branduolinėje medicinoje naudojami radiofarmaciniai preparatai ir įranga turi atitikti aukštus reikalavimus. BM tyrimų skaičius pasaulyje auga apie 5 % per metus, naudojant radiofarmacines medžiagas BM procedūras pasaulyje atlieka daugiau kaip 10 000 ligoninių. Kasmet diagnozuojama ar gydoma virš 40 mln. pacientų, iš jų 9 mln. – Europoje, apie 16 mln. – Jungtinėse Amerikos Valstijose [3]. Terapija sudaro apie 10 % nuo visų atliekamų BM procedūrų. Lietuvoje irgi auga BM atliekamų tyrimų skaičius [9]. Neabejotinai tyrimų skaičius augs, kai bus pastatytas ciklotronas Lietuvoje, taip pat atliekamų tyrimų įvairovė plečiasi dėl naujų radiofarmacinių preparatų patvirtinimo ir atsiradimo rinkoje, tokių kaip ^{166}Ho-Mikrosferos, ^{177}Lu-DOTATATE, ^{213}Bi-DOTATOC, ^{212}Pb-DOTAMTATE ir kt. [10, 11, 12].

Kadangi medicininės procedūros tapo didžiausiu žmogaus veiklos sukeliamos gyventojų jonizuojančiosios apšvitos šaltiniu, kyla susirūpinimas, ar ši apšvita negali pakenkti sveikatai [1, 13, 14]. Siekiant išvengti pacientų nepagrįstos apšvitos ir vadovaujantis ALARA (*angl*. as low as reasonably achievable) principu, pacientų skenavimo protokolai turi būti optimizuoti, dozavimo ir SPECT, SPECT/KT, PET/KT įranga turi būti sukalibruota ir patikrinta [7]. Taikant pažangias JS technologijas BM iškyla klausimai dėl pacientų ir darbuotojų saugumo bei kiti teisiniai aspektai [4, 5, 7, 13, 14].

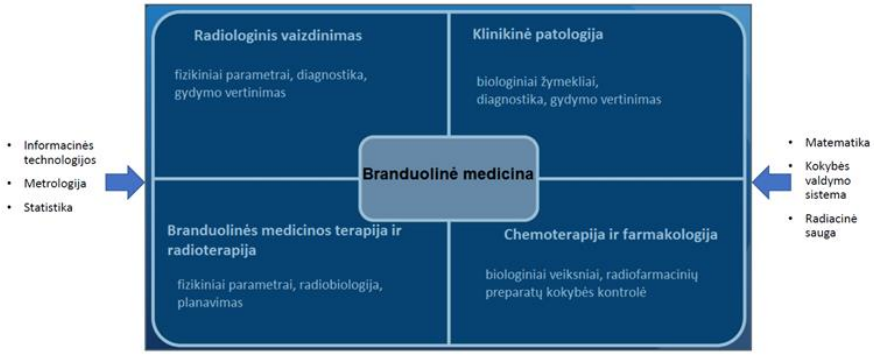
BM naudojami skirtingi JS šaltiniai: atvirieji JS šaltiniai – radiofarmaciniai preparatai ir uždarieji šaltiniai – kalibraciniai ar švitinimo įrenginiai, KT aparatai. Darbas su išvardintais įrenginiais ir šaltiniais leidžiamas tik aukštos kvalifikacijos ir atitinkamų žinių turinčiam personalui, kuris vykdo licencijuotą veiklą [5, 14]. Vykdoma veikla turi atitikti higienos normų reikalavimus.

JS gali sukelti neigiamą poveikį žmogui ir neturi slenkstinės dozės, net ir labai maža dozė padidina vėžinių susirgimų riziką. Norint ją maksimaliai sumažinti, reikia skirti didelį dėmesį dirbančiųjų ir pacientų apšvitos analizei bei optimizavimo darbams.

1.1. Radiacinė sauga branduolinėje medicinoje

JS medicinoje naudojama įvairiose srityse daugiau kaip šimtmetį, BM gydymas taikomas nuo 1941 metų [15]. Kartu su akivaizdžia BM procedūrų nauda kyla ir susirūpinimas, nes JS apšvita gali ir pakenkti sveikatai.

Radiacinę saugą branduolinėje medicinoje reglamentuoja Lietuvos higienos norma HN 77:2015 „Radiacinė sauga branduolinėje medicinoje“ ir HN 73:2018 „Pagrindinės radiacinės saugos normos“. Branduolinės medicinos srityje radiacinė sauga užima vieną pagrindinių vaidmenų, nes atliekant tyrimus ir gydymą su atviraisiais JSŠ, galima nepagrįsta darbuotojų, pacientų ir gyventojų apšvita [4, 5]. Taip pat apie radiacinės saugos sistemą ir principus, fizikinį medicininės apšvitos valdymą, techninių ir fizikinių parametrų įvertinimą, kalibravimą, patikrą, įrangos techninę priežiūrą, radiofarmacinių preparatų paruošimą ir kitus aspektus nurodoma Europos Sąjungos Tarybos direktyvoje 2013/59/Euratomas, TATENA, AAPM, EANM rekomendacijose [6, 7, 13, 16]. Šiuolaikinė branduolinė medicina – tai kompleksinė mokslinė sritis, apimanti daug kitų sričių ir disciplinų (1 pav.).



1 pav. Šiuolaikinės branduolinės medicinos sąsaja su kitomis disciplinomis ir mokslo sritimis.

1.2. Pagrindiniai veiksniai, lemiantys branduolinės medicinos tyrimų atlikimo kokybę

Siekiant kokybiškai atlikti funkcijas ir užtikrinti BM tyrimų kokybę, veiklos vykdytojas diegia kokybės laidavimo sistemą, kuri yra visuma veiksmų (planavimas, koordinavimas, įgyvendinimas), skirtų kokybei palaikyti ar gerinti. KK apima naudojamos įrangos BM kontrolę, stebėseną, vertinimą ir priežiūrą. Kokybės kontrolės tikslas yra užtikrinti darbuotojų ir pacientų radiacinę saugą tyrimų metu bei tinkamą įrangos veikimą ir laiku nustatyti bei pašalinti atsiradusius neatitikimus.

Siekiant kontroliuoti JS apšvitą, ypatingas dėmesys turi būti skiriamas: radiofarmacinių preparatų dozuotės tikslumui, darbuotojų apšvitos ir darbo vietų stebėsenai, diagnostiniams atskaitos lygiams, pacientų dozimetrijos ir skenavimo įrangos patikrai ir kalibravimui.

Visa BM naudojama įranga, nuo kurios priklauso arba gali priklausyti žmonių apšvita, turi būti reguliariai tikrinama [14, 16].

1.3. Branduolinės medicinos įranga ir radiofarmaciniai preparatai

1.3.1. Naudojama įranga

Šiuolaikiniuose BM skyriuose yra naudojama įvairi moderni įranga. Pagrindiniai naudojamos įrangos tipai:

- gama kamera (BM įranga, kuri fiksuoja ir vaizduoja radiofarmacinių preparatų susikaupimą), kardiologinė gama kamera, plokštuminė ar rotacinė gama kamera bei kita diagnostinė branduolinės medicinos įranga, kuri atvaizduoja radiofarmacinių preparatų susikaupimą paciento organizme;
- hibridinė branduolinės medicinos įranga SPECT/KT, PET/KT, PET/MRT (su magnetinio rezonanso tomografijos vaizdinimu);
- radiofarmacinių preparatų generatoriai, ciklotronai, reaktoriai;
- radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuokliai, radionuklidų aktyvumo skaitikliai;
- kita įranga, skirta diagnostikai, dozimetrijai ir radiofarmacinių preparatų KK [16].

Visa ši įranga turi būti metrologiškai patikrinta ir atitikti kokybės reikalavimus. Didžiosios dalies diagnostinės BM įrangos KK vertinimo kriterijai tikrinami su kalibruotais JS šaltiniais ar tiksliais izotopų aktyvumais.

1.3.2. Medicinoje dažniausiai naudojami radionuklidai

Radiofarmaciniai junginiai – vaistiniai preparatai, kurių sudėtyje yra radionuklidų (radioaktyviųjų izotopų) ir farmacinių junginių, pasižyminčių tam tikromis biocheminėmis savybėmis, skirtomis ligų diagnostikai ar gydymui. Radionuklidų generatorius – sistema, kurioje yra naudojamas tam tikras radionuklidas pirmtakas, kuriam skylant, išplovimo ar kitu būdu yra pagaminamas antrinis radionuklidas, pvz.: ^{99m}Tc pagaminamas naudojant reaktorius (^{99}Mo/^{99m}Tc generatorius), kur ^{99}Mo yra motininis radionuklidas. ^{68}Ga pagaminamas iš ^{68}Ge/^{68}Ga generatoriaus. Ateityje gali būti panaudoti ir kiti generatoriai, kaip ^{82}Sr/^{82}Rb, ^{44}Ti/^{44}Sc, ^{62}Zn/^{62}Cu ir kt. [17].

Dažniausiai terapijai naudojamos radiofarmacinės medžiagos:

- kaulų metastazėms: $^{89}SrCl_2$, ^{153}Sm-EDTMP, $^{223}RaCl_2$;

- skydliaukės gydymui: ^{131}I-NaI;
- neuroblastomai: ^{131}I-mIBG;
- žymėtų peptidų receptorių radionuklidų terapijai: ^{90}Y-DOTATOC, ^{90}Y-DOTATATE, ^{177}Lu-DOTATATE;
- kepenų metastazėms: ^{90}Y mikrosferos, ^{166}Ho mikrosferos;
- radionuklidų sinovektomijai: ^{90}Y-, ^{32}P-, ^{186}Re-koloidai, ^{169}Er- citratas, ^{177}Lu- hidroksiapatitas;
- terapijai su PSMA ligandais: ^{177}Lu-PSMA, ^{225}Ac-PSMA ir kt.

Lietuvoje medicinoje naudojami radionuklidai:

- diagnostikai: ^{99m}Tc-, ^{123}I-, ^{131}I-, ^{18}F-, ^{68}Ga- ir kt.
- terapijai: ^{131}I-, ^{89}Sr-, ^{223}Ra-, ^{166}Ho-, ^{177}Lu- ir kt.

Visų šių medžiagų grynumui keliami griežti reikalavimai, todėl šie parametrai turi būti kontroliuojami.

1.3.3. Fizinės naudojamų radiofarmacinių medžiagų charakteristikos

Fizinės radionuklidų charakteristikos lemia jų panaudojimo galimybę skirtingiems tikslams. Tas pats radionuklidas gali būti naudojamas ir diagnostikai, ir terapijai, priklausomai nuo skiriamo aktyvumo, pvz.: taikant kepenų metastazių gydymą ^{166}Ho žymėtomis mikrosferomis, aktyvumas iki 250 MBq naudojamas šuntavimo (plaučių pažeidimo) įvertinimui, o gydymui taikomas ^{166}Ho individualiai pacientui apskaičiuotas aktyvumas, tipinės vertės yra apie 8–10 GBq [10].

Pagrindinės radionuklidų fizinės charakteristikos [6, 18, 19]:

- radionuklido pusėjimo trukmė;
- spinduliuotės energija;
- aktyvumo lygis (kBq, MBq, GBq);
- skilimo rūšis ir schema;
- gavimo metodas (reaktorius, ciklotronas, lazeris [20]);
- fizinės–cheminės savybės.

Šios savybės yra labai svarbios siekiant gydymui parinkti optimalius preparatų tipus ir jų dozes bei užtikrinti jų kokybę ir pamatuojamą tikslumą, nes dėl skirtingų charakteristikų aktyvumui pamatuoti taikomi įvairūs metodai ir kalibravimo koeficientai.

1.3.4. Branduolinės medicinos įrangos kalibravimas

Remiantis HN 77:2015, visų naudojamų radiofarmacinių preparatų aktyvumas, prieš jį panaudojant pacientams, turi būti patikrinamas radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuokliais, taip pat turi būti nustatytos periodinių bandymų apimtys, kurių periodiškumas nustatomas atsižvelgiant į įrangos gamintojo pateiktą informaciją. Jeigu periodiškumas nenurodomas, patikrinimas ir/ar kalibravimas atliekamas ne rečiau kaip 1 kartą per metus [4].

Europos Sąjungos Tarybos direktyvoje 2013/59/Euratomas 56 straipsnyje nurodoma, kad radioterapinis gydymas turi būti individualiai suplanuotas, IAEA Safety Standards Nr. SSD-46, 4.185 punktas nurodo, kad atliekant terapinį gydymą, suleidžiamo radiofarmacinio preparato aktyvumo kiekis turi būti ±5 % skirtume nuo apskaičiuotosios dozės [7, 11]. Siekiant atitikti tarptautinių rekomendacijų reikalavimus (neapibrėžtis ne didesnė kaip 10 % diagnostikos procedūroms), būtina reguliariai tikrinti branduolinės medicinos skyriuose naudojamus radionuklidų kalibratorius [6, 16, 18, 19]. Tuo tarpu, remiantis EANM rekomendacijomis, naudojant automatinę injekavimo įrangą (pvz.: ^{18}F-FDG), nuokrypis turėtų būti ne didesnis kaip ±3 % [21], kurį klinikinėmis sąlygomis yra sudėtinga užtikrinti ir palaikyti.

Nuo ASPĮ naudojamų radionuklidų kalibratorių tikslumo priklauso ir kitos naudojamos įrangos, tokios kaip PET ir SPECT tikslumas, nes įrangos kalibravimui ir patikrai naudojamas sukalibruotas tam tikras radioaktyvios medžiagos kiekis, kuris patalpinamas į specialią talpą/tarą/geometriją/fantomą [22].

1.4. Metrologija ir radionuklidų aktyvumo matavimo technologijos, taikomos branduolinėje medicinoje

Radionuklidų aktyvumo matavimo tikslumas yra labai svarbus branduolinėje medicinoje. Precizinis radionuklidų aktyvumo matavimas vadinamas radionuklidų standartizavimu. Radionuklido aktyvumą galima nustatyti naudojant įvairius matavimo metodus [23]. Kadangi radionuklidai pasižymi skirtingomis fizinėmis savybėmis, jų aktyvumo matavimas priklauso nuo aktyvumo lygio [24]. Taip pat matavimo metodo pasirinkimą nulemia radioaktyviojo skilimo schema ir kitos savybės, kurios plačiau aptartos žemiau pateiktuose skyreliuose.

1.4.1. Pirminiai ir antriniai metodai

Dirbant su mažais radioaktyvios medžiagos kiekiais (nuo Bq iki kelių kBq), dažniausiai naudojami pirminio radionuklidų standartizavimo metodai, tokie kaip 4π β-γ sutapčių proporciniai dujų skaitikliai, trigubų ir dvigubų sutapčių santykių (arba TDCR, angl. Triple-to-Double Coincidence Ratio) skaitikliai, α proporciniai skaitikliai, LTAC (angl. live-timed anticoincidence counters) ir kt [24-27]. Pirminiai metodai pasižymi užtikrinama minimalia matavimų neapibrėžtimi (k=1) ir artimu absoliučiam aktyvumo matavimu. Tokių matavimų standartinės neapibrėžties tipinė vertė, priklausomai nuo metodo ir standartizuojamo radionuklido, yra apie 0,5 % [23, 28].
Kadangi pirminių standartizavimo metodų matavimų trukmė santykinai ilgesnė, praktikoje dažniausiai naudojami antriniai metodai ir etalonai, kurie gali būti platinami vartotojams. Pirminiai metodai yra paremti skilimų skaičiavimu ir laiko matavimu [23]. Antriniai metodai, tokie kaip gama spektrometrija, blyksninių (arba scintiliacinių) tirpalų spektrometrija, yra tinkami radionuklidams standartizuoti nuo keliasdešimt Bq iki kelių kBq [24]. BM dirbama su aktyvumais nuo kelių šimtų kBq iki keliasdešimt GBq, tokiam ruožui užtikrinant metrologinę sietį [25] naudojami antriniai metodai, tokie kaip kalibruota jonizacinė kamera (dozės kalibratoriai), NaI(TI) sistemos, blyksninių tirpalų spektrometrija, gama spektroskopija [26]. Populiariausi metodai aprašyti žemiau.

1.4.1.1. Blyksninių tirpalų spektrometrija

Blyksimųjų detektorių veikimas pasižymi tuo, kad dėl jonizuojančiosios spinduliuotės poveikio atsiranda regimosios arba ultravioletinės šviesos blyksnis, kuris yra detektuojamas. JS poveikis organiniuose scintiliatoriuose pasižymi tuo, kad scintiliatoriuje susidaro daug sužadintos būsenos molekulinių jonų, kai molekulė pereina į pagrindinę būseną, išspinduliuojamas ultravioletinės ar regimosios arba šviesos fotonas [27, 28].

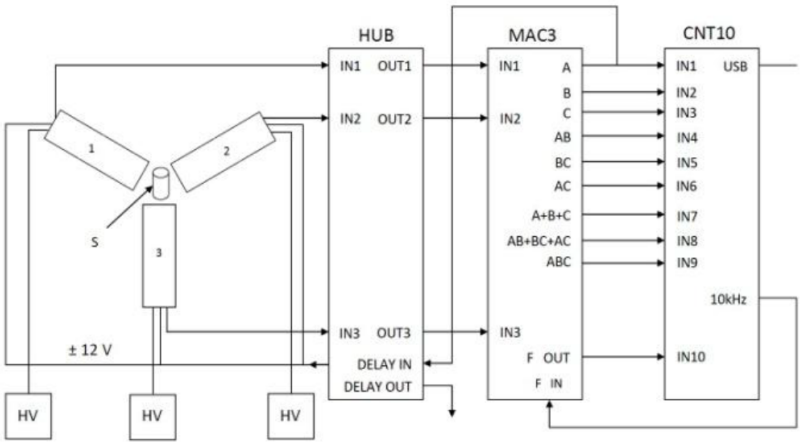
Blyksninių tirpalų spektrometrijos metodo taikyme radioaktyvi medžiaga sumaišoma su kokteiliu, susidedančiu iš tirpiklio ir scintiliatoriaus. Radionuklidui skylant, skilimo energija scintiliatoriuje paverčiama fotonais ir naudojant fotodaugintuvus skaičiuojami blyksniai, kurie įvertinami ir paverčiami aktyvumu, naudojant tipines formules [29].

TDCR ir CIEMAT/NIST metodai yra patvirtinti BIPM kaip pamatiniai metodai tinkantys β spinduolių standartizacijai.

1.4.1.2. TDCR

Elektrono pagavos ir beta skilimo būdais skylančių radionuklidų standartizavimui naudojamas trigubų ir dvigubų sutapčių santykių metodas – TDCR. Šis metodas buvo aprašytas R. Broda et al. straipsnyje [30], radionuklidų tiksliam aktyvumo matavimui scintiliaciniame tirpale pasitelkiami tris fotodaugintuvai (nuklido tirpalas-kokteilis patalpinamas tarp trijų fotodaugintuvų). Naudojant šį metodą, būtina žinoti matuojamo objekto charakteristikas (skilimo schemą), tam kad būtų įvertintas matavimo efektyvumas [30]. TDCR metodo principas – sutapčių panaudojimas nuklido aktyvumo nustatymo tikslinimui.

FTMC yra naudojamas TDCR skaitiklis. Įrenginio fotodaugintuvų modelis – 8850 Burle. Fotodaugintuvai sudėti 120 laipsnių kampu vienas kito atžvilgiu, tarp jų standartiniame 20 ml tūrio matavimo indelyje talpinama tiriamoji medžiaga. Sistema taip pat susideda iš formuojančio stiprintuvo HUB, 10 kanalų skaitiklio CNT10 – BQM (gamintojas – Čekijos Respublika) ir programinės įrangos. Įrenginio schema pavaizduota 2 pav. [31]. Tiriamoji medžiaga talpinama Nr. 5 pažymėtoje vietoje.



2 pav. TDCR skaitiklio sandaros schema (Nr. 1-3 fotodaugintuvai, 5 – matavimo indelis).

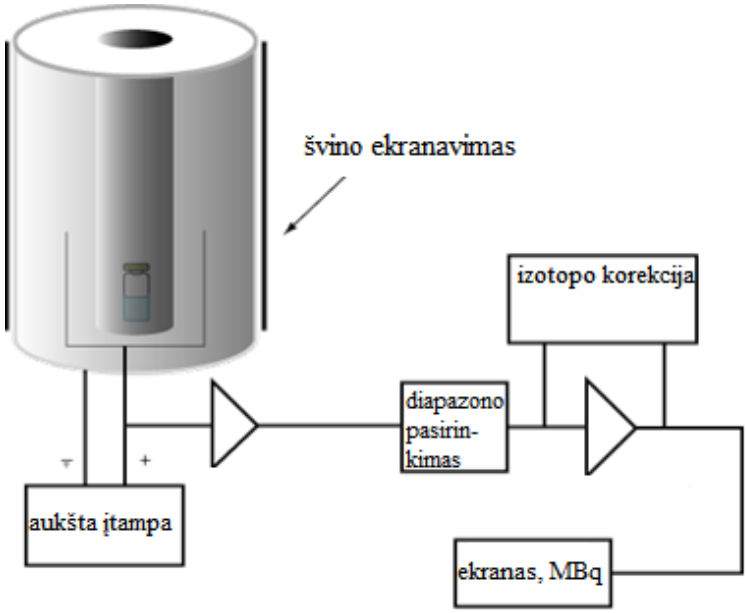
1.4.1.3. Jonizacinės kameros su šuliniu

Jonizacinės kameros su šuliniu arba radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuokliai – taip pat plačiai naudojamas dozės kalibratoriaus terminas, dar kitaip vadinamas jonizacine kamera (3 pav.). Elektringosioms dalelėms pereinant per dujas, jos jonizuoja dujų molekules, todėl atsiranda laisvieji elektronai, jonai, krūvininkai, kurie juda link elektrodų. Kadangi įvyksta

elektros srovės pokyčiai ir keičiasi jos intensyvumas, prietaiso programinė įranga vertina pokyčius ir, pritaikius atitinkamą radionuklido kalibravimo faktorių, atvaizduojamas bandinio/mėginio/ėminio aktyvumas [19]. Jonizacinės kameros tūris dažniausiai užpildomas ksenono ar argono dujomis ir, priklausomai nuo prietaiso paskirties, sukuriamas 7–20 atmosferų slėgis. Prietaisas registruoja radionuklidų energiją nuo 50 keV iki 2 MeV, tiesiškumas nuo 100 kBq iki 100 GBq, taip pat leidžia matuoti skirtingų geometrijų šaltinius [32]. Šis prietaisas pasižymi dideliu matavimo efektyvumu ir universalumu, todėl yra plačiai naudojamas visose ligoninėse.

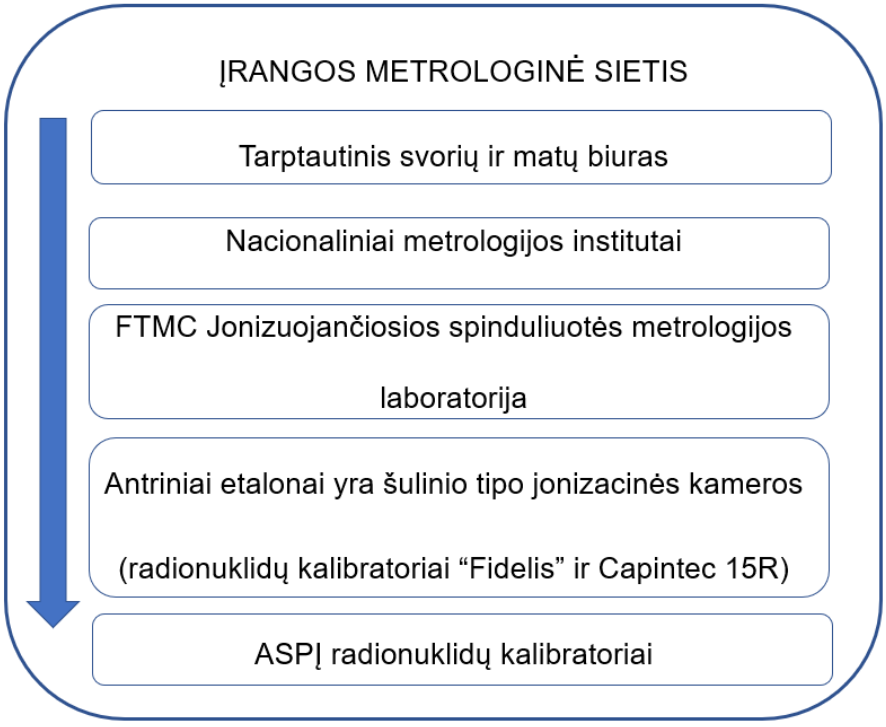
Kadangi kiekvienam radionuklidui priskiriamas kalibravimo faktorius, kuris priklauso nuo spinduliuotės tipo, spinduliuotės energijos, mėginio ar talpos formos, geometrijos, talpos sienelės storio ir medžiagos, šaltinio padėties šulinyje, kiekvienam radionuklidui reikia atlikti įvertinimus ir kalibravimus, ypatingai dirbant su naujais radionuklidais, kurie nėra prietaiso duomenų bazėje [33].

BM naudojamų aktyvumo kalibratorių atsako funkcionalumas, stabilumas, tikslumas, atsižvelgiant į geometriją ir aktyvumo dydį, priklauso nuo reguliaraus palyginimo su metrologiškai patikrinta įranga.



3 pav. Aktyvumo matuoklio bloko schema. Švino ekranas skirtas sumažinti foninės spinduliuotės poveikį matavimų rezultatui. Ekranas rodo srovės pokyčio ir kalibravimo faktoriaus sandaugą.

FTMC naudojamos dvi antrinio standarto jonizacinės kameros su šuliniu – kilnojamoji ir stacionarioji. ASPĮ radiofarmacinių preparatų atsakas lygintas su antrinio dozės kalibratoriaus Capintec CRC-15R (kilnojamosios 4π γ jonizacinės kameros) Nr. 158488 atsaku. Kilnojamoji jonizacinė kamera susieta su stacionariąja jonizacine kamera Fidelis Nr. 06048, jos abi palyginimų būdu susietos su Čekijos Nacionalinio metrologijos instituto etalonu ir yra Lietuvos nacionalinio radionuklidų aktyvumo vieneto etalono didelio aktyvumo srityje dalis. Jonizacinė kamera Fidelis yra sukalibruota NPL (Didžioji Britanija). FTMC naudojamos įrangos metrologinė sietis su Tarptautine vienetų sistema ir ASPĮ radiofarmacinių preparatų sietis su FTMC etalonu pavaizduota 4 pav.



4 pav. FTMC įrangos metrologinė sietis.

Tokiu būdu užtikrinamas ilgalaikis praktikoje naudojamų matavimo prietaisų rezultatų patikimumas ir ASPĮ naudojamų prietaisų stabilumas.

1.4.1.4. Gama spektroskopija

Gryno germanio puslaidininkiniai gama spektrometrai (HPGe) plačiai naudojami aplinkos stebėsenai, medicinoje ir kitose srityse [34]. Gama spektroskopijos metodai tinkami vertinti aplinkos radionuklidinį užterštumą, vykdyti medicininio personalo apšvitos stebėseną ir t.t. Svarbūs aspektai yra detektoriaus efektyvumas ir energinė skyra.

HPGe puslaidininkiniai detektoriai pasižymi didele energijos skiriamąja geba ir detektoriaus efektyvumu bei stabilumu. Toks metodas leidžia tiksliai (k=2) pamatuoti ėminio ar mėginio aktyvumą ir nustatyti radioaktyviąsias priemaišas. FTMC JSML aktyvumo matavimai atlikti gama spektrometrais (ORTEC DSPEC JR 2.0 GEM-15P4, Ortec (JAV) serijos Nr. 07011877 ir CANBERRA GWL 170230-S, Ortec (JAV) serijos Nr. 09997069).

Šis metodas buvo pasitelktas nustatant radionuklido grynumą ir lyginant rezultatus su ASPĮ naudojamu metodu, kai ^{99m}Tc grynumas nustatomas atliekant „Molibdeno (^{99}Mo) skilimo“ bandymą su radiofarmaciniais aktyvumo matuokliais. ^{99}Mo priemaišos natrio pertechnetato (^{99m}Tc) tirpale apskaičiuojamos pagal lygtį 1.

$$\text{Molibdeno } (^{99}\text{Mo}) \text{ priemaišos} = \frac{(^{99}\text{Mo} - ^{99}\text{Mo fonas}) \times 2}{^{99m}\text{Tc} - ^{99m}\text{Tc fonas}} \qquad (1)$$

Eliuato buteliukas įdedamas į švino konteinerį (~6 mm storio sienelėmis), kuris sustabdo 140 keV energijos fotonus ir registruojami tik 740 keV ir 780 keV energijos ^{99}Mo fotonai, lygtis (1) parodo ^{99}Mo santykį su ^{99m}Tc [35, 36].

1.5. Kiti jonizuojančiosios spinduliuotės matavimo prietaisai ir metodai, taikomi ir naudojami branduolinėje medicinoje

Darbuotojų apšvitai įvertinti naudojami pasyvieji ir aktyvieji jonizuojančiosios spinduliuotės registracijos prietaisai. Aktyvieji metodai – elektroniniai dozimetrai, gama zondai ir radionuklidų skaitikliai su NaI(Tl) detektoriais, automatiniai injekavimo prietaisai, taršos matuokliai, dozės galios matuokliai ir kt. [36]. Pasyvieji metodai – individualieji dozimetrai, matuojantys individualiosios dozės ekvivalentą Hp(10), Hp(3) ir Hp(0,07) [37]. Dažniausiai tai termoliuminescenciniai ar optiškai stimuliuoti liuminescencijos dozimetrai. Visa minėta BM įranga turi būti patikrinta arba kalibruota [7, 36, 38].

Profesinės apšvitos vertinimas BM srityje yra nuolatinis ir privalomas procesas. Siekiant sumažinti ir optimizuoti darbuotojų apšvitą, ypač dirbant su didelės energijos radiofarmaciniais preparatais (^{131}I-NaI, ^{18}F-FDG ir kt.), BM skyriuje turi būti įgyvendintos priemonės, mažinančios personalo patiriamą apšvitą nuo jonizuojančiosios spinduliuotės. Nuolatiniam stebėjimui, darbuotojų apšvitos ilgalaikiam vertinimui ir stebėsenai naudojami personaliniai elektroniniai dozimetrai ir pasyvieji metodai [38].

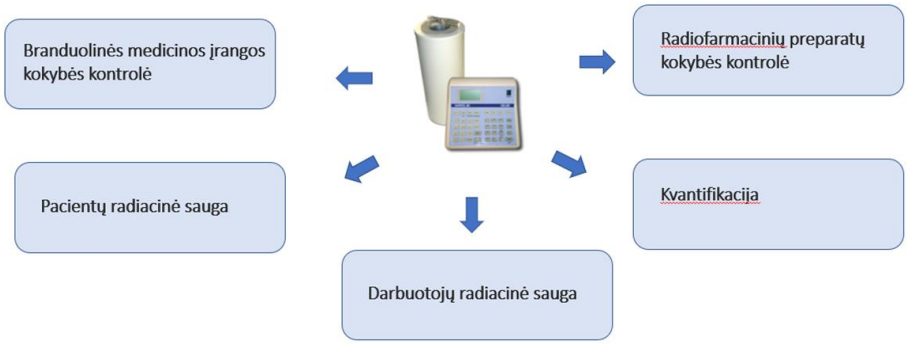
1.6. Skyriaus apibendrinimas

BM įrangai ir radiofarmaciniams preparatams keliami aukšti reikalavimai, KK priklauso nuo kalibruotų jonizacinių kamerų panaudojimo ASPĮ. Automatinių injekavimo prietaisų, kuriuose įmontuoti radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuokliai, išmatuojamas aktyvumas nuo tikrosios vertės neturi skirtis daugiau kaip 3 %, kitiems prietaisams leistinas nuokrypis neturi viršyti daugiau kaip 5 %. Užtikrinant ilgalaikį APSĮ naudojamų matavimo prietaisų rezultatų patikimumą ir prietaisų stabilumą, reikalingas reguliarus patikrinimas su antrinio standarto kalibravimo kameromis. Kalibruotų jonizacinių kamerų taikymas BM užtikrina tinkamą kitos įrangos veikimą ir leidžia daryti prielaidą, kad darbuotojų, pacientų ir gyventojų radiacinė sauga yra užtikrinta, taip pat suteikia galimybę atlikti skenavimo įrangos harmonizavimo ir optimizavimo darbus.

2. RADIOFARMACINIŲ PREPARATŲ AKTYVUMO MATUOKLIŲ PALYGINAMIEJI MATAVIMAI IR RADIOFARMACINIŲ PREPARATŲ NUKLIDINIO GRYNUMO NUSTATYMAS

Radiofarmaciniai junginiai – vaistiniai preparatai, kurių sudėtyje yra radionuklidų ir farmacinių junginių, pasižymintys tam tikromis biocheminėmis savybėmis, skirtomis ligų diagnostikai ar terapijai. Radiofarmacinių junginių kokybės kontrolė atliekama vadovaujantis Lietuvos higienos norma HN 77:2015 „Radiacinė sauga branduolinėje medicinoje“ [5] ir laikantis Europos Sąjungos patvirtintų reikalavimų bei rekomendacijų [35, 39].

Branduolinėje medicinoje naudojamų aktyvumo matuoklių rodmenys yra svarbūs vertinant diagnostinės skenavimo įrangos, kuri fiksuoja, registruoja ir kiekybiškai nustato radiofarmacinio preparato susikaupimą paciento organizme ir sukuria tomografinį radiofarmacinio preparato pasiskirstymo paciento organizme vaizdą, fizinius parametrus (erdvinė skiriamoji geba, gama kameros netolygumas, SUV (pozitronų emisijos tomografijos įrangos standartizuotos kaupimo vertės įvertinimas)), taip pat atliekant pacientų dozimetrinius skaičiavimus ir užtikrinant kokybės kontrolę bei darbuotojų radiacinę saugą [4, 5, 22, 36, 40]. Pagrindiniai parametrai, nuo kurių priklauso tiksliai pamatuotas radiofarmacinio preparato aktyvumas, parodyti 5 pav. Nustatyti radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių kalibravimo faktoriai priskirti tam tikrai šaltinių geometrijai ir radionuklidui pateikti 1 priede.



5 pav. Pagrindiniai parametrai ir faktoriai, priklausantys nuo aktyvumo matuoklio tikslumo.

Atlikti tyrimai Belgijoje, Serbijoje, Olandijoje, Bulgarijoje ir kitose šalyse parodė, kad ASPĮ naudojamų aktyvumo matuoklių poslinkis diagnostiniams ir terapiniams radionuklidams gali viršyti 20 % neapibrėžties lygį [22, 33, 40, 41, 42]. Dirbant su ^{68}Ga, tikėtinas 10–20 % poslinkis į aktyvumo pervertinimą [40, 42].

Yra keletas radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių patikros metodikų. Pirmuoju atveju ūkio subjektui siunčiami kalibraciniai šaltiniai – skirtingos geometrijos ir įvairaus aktyvumo radionuklidai, tačiau šis metodas brangus, netinkantis greitai skylantiems izotopams ir reikalaujantis specialių dokumentų bei leidimų iš reguliuojančiųjų įstaigų. Antruoju atveju į ASPĮ vežamas etalonas ir palyginamųjų matavimų metu nustatomas radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių poslinkis darbiniams radionuklidams ir visoms reikalingoms geometrijoms [19].

2.1. Branduolinėje medicinoje naudojamų radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių palyginamųjų matavimų rezultatai

Siekiant įvertinti Lietuvos ligoninėse naudojamų aktyvumo kalibratorių tikslumą, buvo atlikti ASPĮ radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių palyginamieji matavimai FTMC etalonu Capintec CRC-15R. Naudojamas etalonas buvo patikrintas palyginamųjų matavimų metu, EURAMET projektų rėmuose Nr. 1243 ir Nr. 1437 su CMI (Čekijos Metrologijos Institutas) etalonu [43, 44].

Palyginamųjų matavimų metu, kurie vyko nuo 2016 iki 2021 metų, buvo nustatyta matavimo neapibrėžtis priklausomai nuo radionuklido ir geometrijos (1, 2,5, 3 ir 5 ml švirkštai, kapsulė, strypas ir P6 standartinis buteliukas, kurio matmenys 54x21,75 mm, o sienelės storis 1,2 mm) dažniausiai Lietuvoje gydymui ir diagnostikai naudojamiems radionuklidams ^{18}F, ^{99m}Tc, ^{131}I ir ^{223}Ra bei kalibraciniams šaltiniams, naudojamiems įrangos patikrinimui ir kalibravimui – ^{137}Cs, ^{22}Na ir ^{57}Co. Palyginamųjų matavimų rezultatai pateikti 1 lentelėje. Ligoninėse buvo patikrinta 16 skirtingų gamintojų ir modelių radionuklidų kalibratoriai: Veenstra VDC-404, Veenstra VDC-405, Veenstra VIK-202, COMECER PITAGORA, Capintec CRC-15R, PTW – CURIEMENTOR 2, LEMER PAX ScintiDose, ATOMLAB 100 ir kt.

1 lentelė. Palyginamieji radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių parametrai ir matavimų poslinkis.

Radionuklidas	Aktyvumas, MBq	Radionuklido tūris, ml	Geometrija	Poslinkio įvertinimas	Didžiausias nustatytas poslinkis
^{99m}Tc	150–400	~3	10 ml buteliukas	-3,7─18,3	18,3
^{99m}Tc	~200	~0,3	1 ml švirkštas	-3,8─16,9	16,9
^{99m}Tc	~200	~1,5	2,5 ml švirkštas	-1,2─4,2	4,2
^{99m}Tc	~200	~2	3 ml švirkštas	-1,2─16,3	16,3
^{99m}Tc	~200	~3	5 ml švirkštas	-2─16,8	16,8
^{18}F	~250	~2	10 ml buteliukas	-3,5─8,3	8,3
^{18}F	~250	~3	5 ml švirkštas	-1,2─17,6	17,6
^{123}I	~200	~3	10 ml buteliukas	-1,5─5,3	5,3
^{131}I	~400	-	kapsulė	-5,8─20,1	20,1
^{177}Lu	~900	~3	10 ml buteliukas	-1,6─1,8	1,8
^{223}Ra	1-2	~2	10 ml buteliukas	-9,6─18	18
^{22}Na	~ 3	-	strypas	-4,7─2,1	4,7
^{57}Co	~400	-	strypas	-1,3─1,4	1,4
^{137}Cs	6-9	-	buteliukas	-4─8,9	8,9

Lietuvos ASPĮ branduolinės medicinos skyriuose naudojamų radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių įvertintas tikslumas kito gana plačiose ribose (nuo 1,4 % iki 20,1 %), o didžiausias matavimų poslinkis buvo 8,9 % kalibracinio, 18,3 % diagnostinio ir 20,1 % terapinio tipo šaltiniams. Po atliktų palyginamųjų matavimų ASPĮ buvo perduoti kalibravimo liudijimai su nustatytais kalibravimo koeficientais.

2.2. Branduolinėje medicinoje naudojamų radiofarmacinių preparatų nuklidinio ir radiocheminio grynumo rezultatai

Radiofarmacinių junginių KK atlikimas yra privalomas procesas, kurio metu įvairiais metodais patikrinama, ar junginys yra tinkamas naudoti BM procedūroms, nes priemaišos gali lemti prastesnę diagnostinių vaizdų kokybę, padidėjusią pacientų apšvitą, bloginti radionuklido ir farmacinio preparato sujungimą [5, 38, 39, 45].

2.3. Radiofarmacinių junginių radiocheminis grynumas

Radiofarmacinių junginių radiocheminio grynumo nustatymas BM praktikoje atliekamas naudojant plonasluoksnę chromatografiją (TLC) arba automatinę chromatografijos sistemą. Taikant kylančią popieriaus chromatografiją, naudojamas Whatman 3MM impregnuotas chromatografinis popierius; mobiliai fazei – acetonas, kiti reagentai ir jų mišiniai. Radiofarmacinio junginio nedidelis kiekis (iki 1 MBq) užlašinamas ant TLC juostelės ir įmerkiamas į atitinkamą tirpalą. Priklausomai nuo to, koks junginys tikrinamas, praėjus tam tikram laikui chromatografinė juostelė išimama iš tirpalo, perkerpama į dvi dalis ir tos dalys pamatuojamos radiofarmacinių junginių aktyvumo matuokliu. Radiofarmacinių junginių radiocheminis grynumas turi būti >95 %, tam tikroms radiofarmacinėms medžiagoms gali skirtis ir būti mažesnis [39, 46, 47]. Radiofarmacinio junginio radiocheminis grynumas apskaičiuojamas pagal 2 lygtį. Atliktų matavimų rezultatai pateikti 2 lentelėje.

$$\text{Radiocheminis grynumas [\%]} = \frac{\text{priemaišos radioaktyvumas}}{\text{bendras juostelės aktyvumas}} \times 100\ \% \qquad (2)$$

2 lentelė. Radiofarmacinių junginių radiocheminio grynumo rezultatai.

Radiofarmacinis junginys	Metodas	Ribos (%)*	Rezultatai
^{99m}Tc-merkaptoacetiltriglicinas	TLC	>95	98,11±1,29 % (n=21)
^{99m}Tc-agreguotas makroalbuminas	TLC	>95	99,11±1,49 % (n=14)
^{99m}Tc-metileno difosfonatas	TLC	>95	98,51±2,55 % (n=24)
^{99m}Tc-dietilentriamino pentaacto rūgštis	TLC	>95	97,46±2,93 % (n=19)
^{99m}Tc-dimerkaptosukcininė rūgštis	TLC	>95	95,73±3,85 % (n=8)

*- pagal Europos farmakopėjos ribas [39].

2.3.1. Radiofarmacinių preparatų nuklidinio grynumo rezultatai

Molibdeno (^{99}Mo) skilimo bandymas atliekamas radionuklidų generatoriams – ^{99}Mo/^{99m}Tc ir kitoms radiofarmacinėms medžiagoms, siekiant įvertinti nuklidinį grynumą. Taip pat gali būti naudojami ir kiti patvirtinti metodai, leidžiantys nustatyti ^{99}Mo kiekį, kuris turi būti mažesnis nei 0,1 % nuo bendro aktyvumo [39].

Palyginamųjų matavimų metu buvo panaudoti du metodai: „Molibdeno (^{99}Mo) skilimo testas (angl. ^{99}Mo breakthrough) molibdeno kiekiui nustatyti su VUL SK aktyvumo matuokliu Veenstra VDC-405 (1 pav.) ir FTMC Jonizuojančiosios spinduliuotės metrologijos laboratorijos γ spektrometrijos įranga su germanio detektoriumi (HPGe).

Nuklidinio grynumo nustatymo rezultatai pateikti 3 lentelėje. Atlikti tyrimai parodė, kad ^{99m}Tc nuklidinis grynumas buvo didesnis nei 99,9 %, γ spektrometrijos metodas naudojamas siekiant tiksliau įvertint priemaišų kiekį, taip pat toks metodas tinka kitiems radiofarmacinių preparatų (^{18}F-FDG, ^{123}I-DaTscan ir t.t.) nuklidiniam grynumo nustatymui.

3 lentelė. ^{99m}Tc radionuklidinio grynumo nustatymo rezultatai.

Nr.	γ spektrometrija, ^{99}Mo priemaišų %	^{99}Mo priemaišų % testas
1.	0,00408	0,080
2.	0,00033	0,001
3.	0,00039	0,001
4.	0,00026	0,005
5.	0,00447	0,004

2.4. Skyriaus apibendrinimas

Lietuvos ASPĮ BM skyriuose naudojamų radiofarmacinių preparatų ilgalaikis (nuo 2016 iki 2021 metų) radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių tikslumo vertinimas parodė, kad dirbant su diagnostiniais radionuklidais kaip ^{99m}Tc ar ^{18}F didžiausias poslinkis siekia 18,3 %, terapiniams šaltiniams kaip ^{131}I – 20,1 %, ^{223}Ra – 9,6 %, ^{137}Cs kalibraciniams šaltiniams – 8,9 %. Kitų šalių praktika rodo, kad poslinkis gali viršyti 44 % [40], ar tam tikrais atvejais 72 % [22].

Vertinant radiofarmacinių preparatų kokybę, nustatyta, kad radiofarmacinių preparatų radiocheminis grynumas viršijo 95,73 %. ^{99m}Tc nuklidinio grynumo nustatymo rezultatai parodė, kad visais atvejais preparatų kokybė tenkino keliamą 0,1 % nuokrypio nuo bendro aktyvumo grynumo kriterijų.

3. JONIZUOJANČIOSIOS SPINDULIUOTĖS POVEIKIO VERTINIMAS BRANDUOLINĖS MEDICINOS DARBUOTOJAMS

Jonizuojančiosios spinduliuotės naudojimas yra svarbi ligų profilaktikos ir kontrolės bei gydymo veiklų dalis, todėl labai svarbu užtikrinti tinkamą gyventojų ir darbuotojų apsaugą nuo jonizuojančiosios spinduliuotės nepageidaujamo poveikio [48].

Branduolinės medicinos darbuotojų, dirbančių su jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniais, apšvitos stebėsenos programa Lietuvoje vykdoma nuosekliai ir sistemingai, siekiant užtikrinti darbuotojų sveikatos saugą nuo žalingo jonizuojančiosios spinduliuotės poveikio ir sumažinti vėžinių susirgimų bei genetinių pakitimų išsivystymo tikimybę [4, 5, 7, 48]. Vykdant šias programas labai svarbu surinkti patikimą informaciją apie BM darbuotojų patiriamas JS apšvitos dozes, kurios buvo užfiksuotos individualiais dozimetrais. Patikimas darbuotojų dozimetrijos užtikrinimas yra svarbus veiksnys optimizuojant gydomąją veiklą. BM personalo, dirbančio su radiofarmacinėmis medžiagomis ir uždaraisiais JS šaltiniais, gaunamos apšvitos ilgametė stebėsena ir jos analizė gali padėti įvertinti ir prognozuoti galimą sergamumą vėžiu ar kitomis specifinėmis ligomis, todėl atliekami epidemiologiniai tyrimai [49, 50].

Jonizuojančioji spinduliuotė – vienas iš svarbiausių fizinių veiksnių, galintis sukelti leukemiją ir kitas kraujotakos sistemos ligas, odos, smegenų, skydliaukės, krūties vėžį ir kitas neužkrečiamas ligas [51, 52, 53]. Šiuo metu yra labai mažai informacijos apie rizikų vertinimą, kuri būtų susieta su JS naudojimu BM procedūrų metu. Dėl santykinai mažų apšvitos dozių gali atsirasti tik atsitiktiniai JS sukelti reiškiniai ir su tuo susijusios ligos. Jungtinių Tautų mokslinio komiteto atominės spinduliuotės poveikiui tirti paskelbta ataskaita rodo, kad didžioji BM darbuotojų dalis, kurie tiesiogiai nedirba su radiofarmaciniais preparatais, patiria labai mažą JS apšvitą, jų metinės dozės neviršija 1 mSv, o darbuotojų, kurie tiesiogiai dirba su ^{131}I, metinės dozės buvo 0,35–3,27 mSv diapazone [54].

3.1. Epidemiologiniai tyrimai ir JS poveikio efektų rizikos vertinimas

Epidemiologiniai tyrimai – tai ilgamečiai tyrimai, kurių metu tiriami dideli žmonių duomenų rinkiniai, siekiant nustatyti, ar JS apšvita yra susijusi su tam tikromis ligomis. Vienas populiariausių metodų yra BEIR VII rizikos vertinimo modelis.

Išsami turimų biologinių ir biofizinių duomenų apžvalga patvirtina tiesinio beslenksčio (*angl*. linear-no-threshold) JS rizikos modelį, pagal kurį vėžio rizika didėja tiesiškai. Kai tiriamoji grupė patiria 100 mSv ar mažesnes dozes, dėl statistinių ribojimų ir kitų priežasčių sunku įvertinti vėžio riziką žmonėms [55].

3.2. Skydliaukės vėžio ir leukemijos rizikos vertinimas ir rezultatai, panaudojant BEIR VII modelį

BEIR VII rizikos vertinimo modelis leidžia įvertinti vėžio rizikos ir kitų pasekmių sveikatai tikimybę, atsirandančią dėl apšvitos jonizuojančiąja spinduliuote mažomis dozėmis. BEIR VII rizikos vertinimo modelis apima 11 tipų vėžinių susirgimų prognozavimą.

BEIR VII, UNSCEAR, ICRP rizikos modeliai įvertina visą gyvenimą trunkančios JS sukelto vėžio ir mirtino vėžio riziką kaip apribotosios dozės, kurią gauna paveikto asmens organas ar audinys, funkciją [55, 56, 57]. Remiantis BEIR VII Life Attribute Risk modeliu, bendra įvairių galimų vėžinių susirgimų rizika yra 0,012 %/mSv, o mirtinų susirgimų – 0,006 %/mSv. Pagal ICRP modelį tokia rizika atitinkamai yra 0,017 %/mSv ir 0,004 %/mSv [49].

Siekiant įvertinti BM darbuotojų vėžinių susirgimų riziką, atlikta BM personalo, dirbančio su JSŠ nuo 1992 m. iki 2017 m., gautos apšvitos analizė. Buvo išanalizuoti duomenys apie BM personalo, dirbančio ASPĮ, gautas efektines dozes. Informacija gauta iš Valstybės jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinių ir darbuotojų apšvitos registro. Ištirti 272 darbuotojų, kurie per 26 metus dirbo penkiose Lietuvos ligoninėse, BM srityje, 2059 metinių efektinių dozių rezultatai. Vidutinės darbuotojų metinės efektinės dozės buvo suskirstytos į tris periodus nuo 1992–1999 m., 2000–2011 m. iki 2012–2017 m. Išmatuotos vidutinės darbuotojų metinės efektinės dozės nuo pirmo iki antro periodo sumažėjo nuo 1,56±0,21 mSv iki 0,47±0,23 mSv ir trečio periodo metu siekė 0,31±0,1 mSv. Konservatyvus skydliaukės vėžinių susirgimų vertinimas atliktas naudojant RadRAT 4.1.1 programinį paketą (https://irep.nci.nih.gov/radrat [58]).

Rizikos įvertinimas susirgti skydliaukės vėžiu ir leukemija pateiktas 4 lentelėje. Atliktame rizikos vertinime padaryta prielaida, kad darbuotojai pradėdavo dirbti su JS BM skyriuose sulaukę 30 metų, ir jų įvertintos metinės dozės buvo intervale 0,1–20,0 mGy. Skaičiavimuose kaip baziniai gyventojai (empiriniai foniniai sergamumo lygiai ir kiti duomenys) buvo pasirinkta Prancūzijos darbuotojų patirusių JS apšvitą kohorta (2003–2007 m.) [49].

4 lentelė. Jonizuojančiosios spinduliuotės veiksniui priskiriama rizika susirgti skydliaukės vėžiu per visą gyvenimą 100 000 žmonių.

1992-2017 BM darbuotojų dozės		Skydliaukės vėžio rizika x10^{-5}		Leukemijos vėžio rizika x10^{-5}	
		Vyras	Moteris	Vyras	Moteris
2.5 mGy	hipotetiškai	0,2	0,8	2,0	1,4
10 mGy	hipotetiškai	0,6	3,3	8,3	5,7
25 mGy	hipotetiškai	2,2	20,7	8,1	14,1
100 mGy	hipotetiškai	6	32,7	82,9	56,6
20.5 mGy	Dydž. gauta vyro dozė	1,8		16,3	
69.3 mGy	Dydž. gauta moters dozė		27,1		37,3

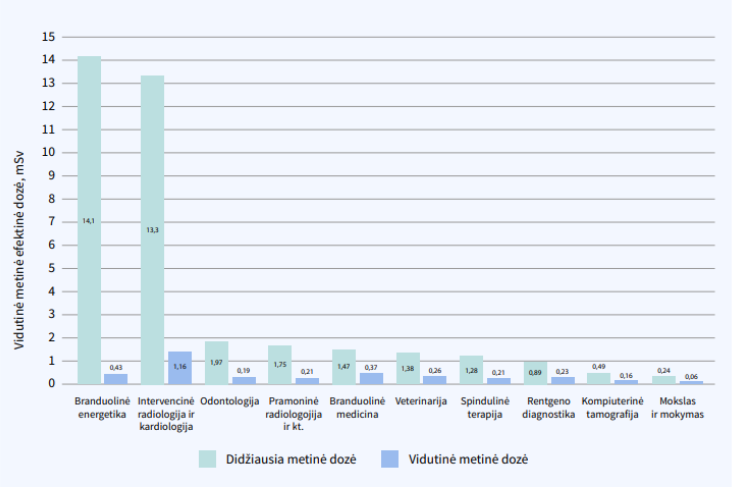
3.3. Skyriaus apibendrinimas

Remiantis Valstybės jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinių ir darbuotojų apšvitos registro duomenimis, didžiausios darbuotojų metinės efektinės dozės buvo 15,8 mSv radiologijos technologui ir 10,9 mSv slaugytojui. Vertinant 1992–2017 m. laikotarpį, vidutinės darbuotojų metinės efektinės dozės nuo 1992–1999 m. iki 2012–2017 m. periodo sumažėjo nuo 1,56±0,21 mSv iki 0,31±0,1 mSv. Įvertintos rizikos byloja, kad darbuotojų moterų skydliaukės vėžio rizika buvo iki 5,7 karto didesnė nei vyrų, nes jos dažniau atlieka procedūras, kurių metu gaunamos didesnės apšvitos dozės, bei moterų organizmas yra jautresnis JS poveikiui.

Dozimetrinių matavimų analizė ir rizikų vertinimas yra svarbus procesas, kuris leidžia kontroliuoti ir optimizuoti BM vykdomas gydomosios veiklos praktikas.

4. BRANDUOLINĖS MEDICINOS DARBUOTOJŲ PATIRIAMOS VISO KŪNO Hp(10) IR RANKŲ Hp(0,07) APŠVITOS ĮVERTINIMAS

Profesinės apšvitos vertinimas BM personalui apima viso kūno Hp(10) ir rankų Hp(0,07) matavimus ir apšvitos vertinimus. Kartais gali būti naudojama akių lęšiuko apšvitos stebėsena Hp(3) personalui, atliekančiam radiofarmacinių preparatų paruošimo darbus „karštojoje“ laboratorijoje ir dirbant su terapinių lygių aktyvumo preparatais [59]. Be išorinės apšvitos, BM darbuotojams, dirbantiems su atviraisiais radioaktyviaisiais šaltiniais, papildomai atliekami ir vidinės apšvitos įvertinimai, siekiant įvertinti galimos vidinės taršos riziką. Remiantis Radiacinės saugos centro pateikta informacija [60], didžiausias metines efektines dozes gauna branduolinės energetikos, intervencinės radiologijos ir kardiologijos, odontologijos, pramoninės radiologijos ir branduolinės medicinos darbuotojai, tačiau pagal vidutinę metinę dozę didžiausias dozes patiria intervencinės radiologijos ir kardiologijos srities darbuotojai, tuomet branduolinės energetikos ir branduolinės medicinos personalas (6 pav).



6 pav. Lietuvos darbuotojų gautos metinės efektinės dozės atskirose veiklos srityse (RSC 2021 ataskaita).

4.1. Profesinės apšvitos vertinimas

Profesinės apšvitos stebėsena dažniausiai vykdoma pasyviaisiais dozimetrais: radiografiniais filmais, termoliuminescenciniais dozimetrais (TLD), radiofotoliuminescenciniais stiklo dozimetrais (*angl.*

radiophotoluminescent glass dosimeters), optiškai stimuliuojamos liuminescencijos dozimetrais (OSL), tiesioginio jonų kaupimo dozimetrais DIS (*angl.* Direct Ion Storage Dosimeter) ir kt. [61, 62].

Profesinės apšvitos stebėsena BM vykdoma matuojant ir vertinant išorinės apšvitos dozes pasyviaisiais ir aktyviaisiais dozimetrais, vidinė apšvita matuojama panaudojant prietaisus su NaI(Tl) ir HPGe detektoriais. Jeigu įvertinta vidinės apšvitos dozė artima ar didesnė nei 1 mSv, remiantis HN 112:2019 „Vidinės apšvitos monitoringo reikalavimai“, turi būti atliekami papildomi vidinės apšvitos tyrimai [63], taip pat vykdoma darbuotojų apšvitos ir darbo vietų stebėsena [4, 5, 64]. Vykdant specialią ar nuolatinę darbuotojų, patiriančių JS apšvitą, stebėseną, taip pat gali būti atliekami ekskrecijos produktų (šlapimo) radiologiniai matavimai.

Būtina pabrėžti, kad TLD minimali detektuojama dozė yra ~50 µSv (dažniausiai dozimetro nešiojimo periodas 3 mėnesiai), tam tikri TLD dozimetrai išmatuoja mažiausią dozę 10 µSv (neapibrėžties ribos 50 % [65]), OSL užfiksuojama dozė siekia 10–20 µSv [66, 67].

4.2. Branduolinės medicinos darbuotojų Hp(10) apšvitos problematika

Vadovaujantis RSC direktoriaus įsakymu Nr. 63 „Dėl Apšvitą patiriančių darbuotojų apšvitos ir darbo vietų stebėsenų atlikimo taisyklių patvirtinimo“ [68], darbuotojams, dirbantiems su JS šaltiniais, kai išorinė apšvita gali sudaryti ar lemti 10 % metinės dozės ribos galūnėms, turi būti vieną mėnesį per metus matuojamos gaunamos dozės. Pagal gautus rezultatus prognozuojamos ir įvertinamos metinės išorinės apšvitos lygiavertės dozės. Prognozuojamą personalo apšvitą taip pat galima įvertinti naudojant pasyviuosius dozimetrus klijuojant ar tvirtinant juos BM patalpose ir paliekant juos ilgalaikei aplinkos stebėsenai [65]. Ilgalaikiai individualiųjų dozių matavimų rezultatai rodo, kad BM personalas, palyginti su kitų medicinos sričių darbuotojais, išskyrus personalą, dirbantį intervencinėje radiologijoje ir kardiologijoje, gauna didesnes išorinės apšvitos dozes [69].

^{18}F neekranuoto radionuklido gama konstanta ore ($1{,}879 \cdot 10^{-4}$ mSv/val vienam MBq 1 metro atstumu [70]) yra apie penkis kartus didesnė, palyginti su plačiai naudojamu ^{99m}Tc ($3{,}656 \cdot 10^{-5}$ mSv/val vienam MBq 1 metro atstumu [71]). Kadangi dirbančių su atviraisiais radioaktyviaisiais šaltiniais BM darbuotojų išorinė stebėsena yra reglamentuota teisės aktais, siekiant sumažinti ir optimizuoti darbuotojų apšvitą, ypatingai dirbant su didelės energijos radiofarmaciniais preparatais (^{18}F-FDG ir kitais), BM skyriuje įgyvendintos įvairios priemonės, mažinančios personalo gaunamą apšvitą nuo

jonizuojančiosios spinduliuotės [72, 73]. ^{18}F-FDG procedūros seka pavaizduota 7 pav. Tipinės dozės, gaunamos BM personalo, dirbant su ^{18}F-FDG, yra apie 5–9 µSv, dozės skiriasi dėl skirtingų sąlygų, personalo veiksmų, skenavimo įrangos, naudojamų dozimetrų ir t. t. [74].



7 pav. 18F-FDG procedūros seka.

Ekranuoti automatiniai radiofarmacinių preparatų injektoriai efektyviai apsaugo nuo skleidžiamos jonizuojančiosios spinduliuotės ir leidžia sumažinti apšvitą PET tyrimų metu [73]. Tai yra svarbu, nes darant prielaidą, kad BM personalas dirba 250 dienų per metus ir atlieka ne mažiau 10–15 PET/KT skenavimų per dieną, metinė Hp(10) dozė gali viršyti 3–5 mSv, o tai yra 50 % ir didesnė dozė, lyginant su kitus tyrimus atliekančio BM personalo tipine doze [75, 76, 77].

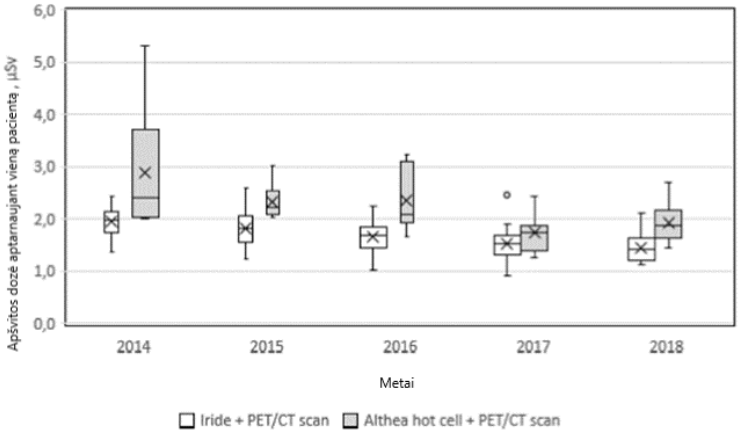
4.3. Branduolinės medicinos darbuotojų Hp(10) apšvitos vertinimų rezultatai

Darbuotojų apšvitos ilgalaikei stebėsenai ir patiriamos apšvitos vertinimui buvo panaudoti personaliniai elektroniniai dozimetrai (EPD) POLIMASTER PM1610B-01. Tyrimas buvo atliktas 2014–2018 m. VULSK Branduolinės medicinos skyriuje, dirbant su ^{18}F-FDG. Radiofarmaciniams preparatams dozuoti ir injekuoti naudojama automatinė injekavimo sistema COMECER IRIDE ir ekranuota traukos spinta COMECER ALTHEA su automatiniu

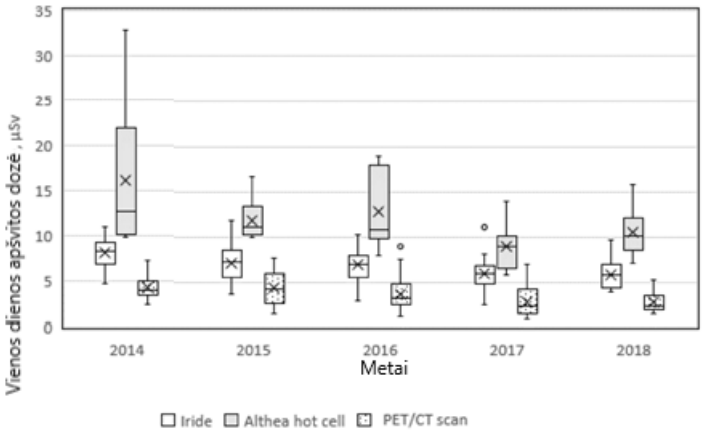
injektoriumi COMECER WIS. Atlikti 443 matavimai su EPD, tuo pačiu metu BM personalas, dirbantis su ^{18}F-FDG, nešiojo pasyvius TLD ar OSL dozimetrus.

Pozitronų emisijos tomografijos tyrimų metu įvertinta patiriama personalo apšvita su EPD atliekant tyrimą vienam pacientui buvo: medicinos fizikui 0,29±0,09 µSv; technologui, dirbančiam su traukos spinta ALTHEA su automatiniu injektoriumi WIS, 1,72±0,33 µSv; technologui, dirbančiam su automatiniu ^{18}F-FDG injekavimo prietaisu IRIDE, 1,16±0,11 µSv; technologui, guldančiam ir skenuojančiam pacientą, 0,52±0,07 µSv ir administruojančiam personalui – 0,30±0,15 µSv per vieną darbo dieną (8 pav.). 9 paveikslėlyje parodytos darbuotojų, dirbančių su skirtinga įranga, dienos JS apšvitos dozės.

Išmatuotos ir įvertintos BM darbuotojų apšvitos dozės yra mažesnės palyginus su kitų šalių duomenimis [73]. Panaudotos įvairios optimizavimo priemonės: ekranuotos laukimo palatos, paruošto ^{18}F-FDG preparato perdavimo anga, nubrėžtos pagalbinės linijos, jungiančios injekcijų patalpą, laukimo patalpas ir skenavimo patalpą bei išėjimą, EPD perspėjimo sistemų naudojimas leido sumažinti gaunamą apšvitą [70]. Tokių priemonių panaudojimas gali tarnauti kaip gerosios praktikos pavyzdys ir kitų šalių asmens sveikatos priežiūros įstaigose.



8 pav. Darbuotojų patiriama apšvita vienos procedūros metu dirbant su ^{18}F-FDG.



9 pav. Radiologijos technologų, atliekančių ^{18}F-FDG injekcijas su IRIDE arba ALTHEA/WIS sistemomis ir PET/KT, atlikimo metu patiriamos JS apšvitos dozės.

EPD matavimo rezultatai buvo palyginti su pasyviųjų TLD ar OSL asmeninių dozių matavimų rezultatais iš akredituotos dozimetrijos tarnybos. Pagal jų duomenis, BM personalo Hp(10) apšvita dažniausiai neviršijo minimalaus išmatuojamo dydžio arba metinė dozė buvo mažesnė nei 2 mSv, todėl detaliai apšvitos analizei EPD yra tinkamesnė priemonė apšvitos stebėjimui ir vertimui [49, 78].

4.4. Branduolinės medicinos darbuotojų Hp(0,07) apšvitos problematika

Branduolinės medicinos personalo darbas ir atsakomybės apima skirtingus procesus, tokius kaip pacientų pasitikimas ir paruošimas tyrimams ir gydymui, skenavimo įrangos patikrinimas ir pasiruošimas darbui, radiofarmacinių preparatų paruošimas ir injekavimas, radiofarmacinių preparatų kokybės kontrolės atlikimas, radioaktyviųjų atliekų tvarkymas ir t. t. Išvardintų procesų metu didžiausia BM personalo apšvita patiriama dirbant su atviraisiais radioaktyviaisiais šaltiniais ir jų aplinkoje, atliekant radiofarmacinių preparatų ruošimą ir injekavimą, ypač atliekant procedūras su terapiniais radionuklidais [79, 80]. BM radiologijos technologų rankos turi tiesioginį sąlytį su radionuklidais, todėl svarbu tiksliai žinoti, kokia apšvita patiriama skirtingų procedūrų metu ir dirbant su skirtingais radionuklidais. Šiuo metu BM radiologijos technologų rankų dozės matuojamos nešiojant žiedinį dozimetrą ant dominuojančios rankos piršto pagrindo [81]. Vis dėlto, dozių pasiskirstymas tarp skirtingų vietų rankos plaštakoje yra nevienodas, todėl

žiedinio dozimetro dozių vertės gali labai skirtis ir rodyti mažesnę apšvitą [82], tai ypač aktualu pirštų galiukams, nes kasdieniniame darbe tai nepatogi dozimetro nešiojimui vieta. Taip pat, esant nekokybiškai ar neergonomiškai rankų dozimetrų konstrukcijai, kai kurie darbuotojai kartais nenešioja dozimetrų (neatliekama nuolatinė rankų apšvitos stebėsena), todėl jų patiriama rankų apšvita nėra tiksliai žinoma ir yra vertinama konservatyviai [69, 83].

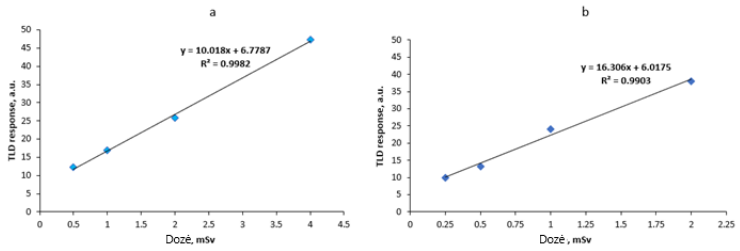
4.5. Branduolinės medicinos darbuotojų Hp(0,07) apšvitos vertinimų rezultatai

Darbuotojų apšvitos stebėsenai ir patiriamos apšvitos vertinimui, dirbant su ^{18}F ir ^{99m}Tc ženklintais radiofarmaciniais preparatais buvo panaudoti TLD-100 dozimetrai. Dozimetrai buvo kalibruoti naudojant ^{18}F ir ^{99m}Tc šaltinius, atitinkamai, 0,25–2 mSv ir 0,5–4 mSv diapazone ir nuskaityti su RIALTO TLD (NE Technology) skaitytuvu. ^{18}F ir ^{99m}Tc aktyvumas buvo pamatuotas su patikrintais radiofarmacinių preparatų matuokliais, kurių poslinkis neviršijo 3 %.

^{18}F ir ^{99m}Tc kalibravimo kreivės pavaizduotos 10 pav. TLD dozimetrams kalibravimui realizuotos dozės buvo apskaičiuotos naudojant lygtį (3):

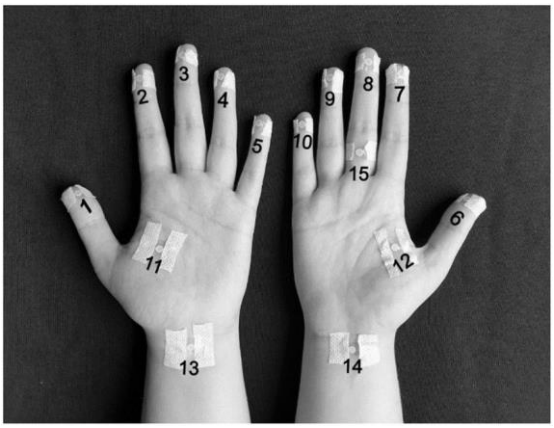
$$D_{rate} = \frac{\Gamma \cdot A}{d^2} \quad (3)$$

D_{rate} – gama spinduliuotės ekvivalentinė dozės galia, Γ – specifinė gama konstanta (^{18}F atveju 1,879*10^{-4} mSv/val. vienam MBq už 1 metro, ^{99m}Tc atveju 3,656·10^{-5} mSv/val, vienam MBq 1 metro atstumu), A – šaltinio aktyvumas, d – atstumas nuo JS šaltinio. Kadangi ^{99m}Tc ir ^{18}F greitai skyla (pusėjimo trukmės atitinkamai 6 val. ir 110 min.) aktyvumas buvo perskaičiuotas, atsižvelgiant į skilimo pusėjimo trukmę ir įvertinus foninį aktyvumą.



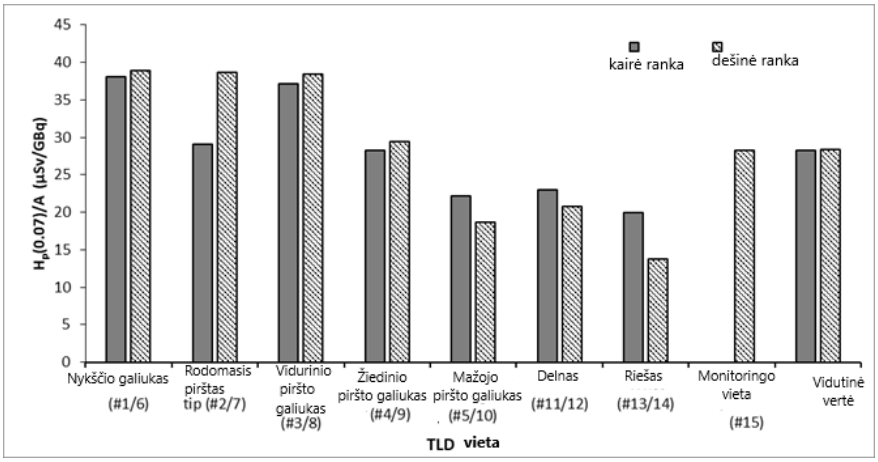
10 pav. ^{18}F ir ^{99m}Tc kalibracinės kreivės.

TLD dozimetrų nešiojimo vietos pavaizduotos 11 pav., iš viso buvo pasirinkta 15 TLD-100 nešiojimo pozicijų abiem rankoms. Buvo atlikti 7 matavimai (kiekvienas matavimas truko apie savaitę) personalui, dirbančiam „karštojoje“ laboratorijoje su ^{99m}Tc (preparatų ruošimas, KK atlikimas), 5 matavimai injekuojant ^{99m}Tc radiofarmacinius preparatus ir 5 matavimai dirbant su ^{18}F radionuklidu (su IRIDE automatiniu ekranuotu injektoriumi).

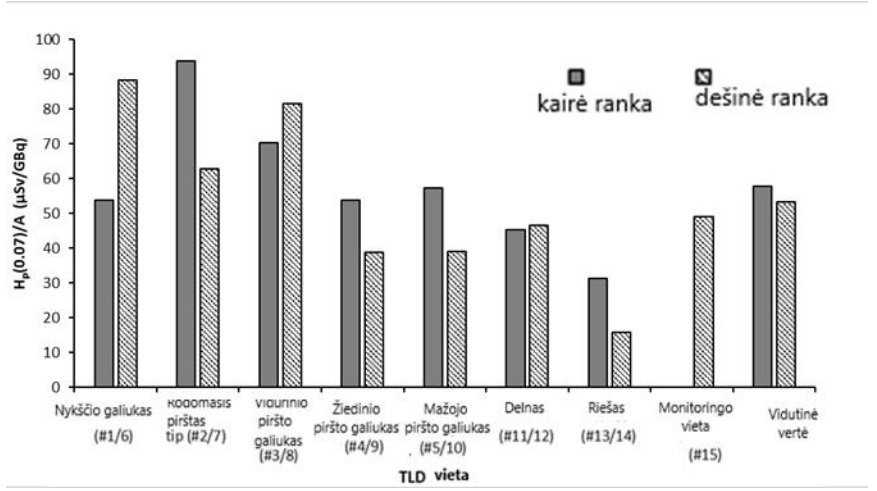


11 pav. TLD dozimetrų matavimų vietos.

Rankų apšvitos vertinimo rezultatai parodė, kad dirbant su ^{99m}Tc radiofarmaciniais preparatais, dešinė (dominuojanti) ranka gavo iki 2,2 karto didesnę apšvitos dozę, palyginti su kaire (nedominuojančia) ranka. Dirbant „karštojoje“ laboratorijoje su ^{99m}Tc radiofarmaciniais preparatais, didžiausia vidutinė apšvitos dozė teko dešiniojo nykščio galiukui (vidutinė dozė buvo 730±220 μSv/GBq). Dirbant su ^{18}F, apšvitos dozės maždaug tolygiai pasiskirstė tarp abiejų rankų, didžiausia apšvitos dozė (12 pav.) buvo nustatyta dešinės rankos nykščio galiukui (vidutinė dozė buvo 39±15 μSv/GBq). Darbas su IRIDE sistema leidžia ženkliai sumažinti darbuotojų rankų apšvitą – palyginus ^{99m}Tc rankinį injekavimą (13 pav.) su ^{18}F automatiniu, nepaisant aukštos gama kvantų energijos, patiriama apšvita yra mažesnė. Taip pat nustatyta, kad pirštų galiukų dozės buvo 1,3–2,4 kartų didesnės, palyginti su dozėmis, kurios fiksuojamos įprastoje stebėsenos vietoje (15 pozicija, 11 pav.) [84].



12 pav. Išmatuotų apšvitos dozių pasiskirstymas dirbant su ^{18}F-FDG.



13 pav. Išmatuotų apšvitos dozių pasiskirstymas dirbant „karštojoje“ laboratorijoje su ^{99m}Tc radiofarmaciniais preparatais.

4.6. Skyriaus apibendrinimas

Rezultatai parodė, kad tipinės dozės, patiraimos BM personalo, dirbant su ^{18}F-FDG, yra apie 5–9 µSv. Įvertinta patiriama personalo apšvita atliekant tyrimą vienam pacientui buvo: medicinos fizikui 0,29±0,09 µSv; technologui 1,72±0,33 µSv dirbant su traukos spinta ir automatiniu injektoriumi WIS; technologui 1,16±0,11 µSv, dirbant su IRIDE ir technologui, guldančiam ir skenuojančiam pacientą 0,52±0,07 µSv. Gauti rezultatai yra mažesni palyginti su kitų šalių praktika, nes naudojamos apšvitos optimizavimo ir mažinimo

priemonės, kaip švirkštų ekranavimas, ekranuoti aktyvumo pernešimo konteineriai, automatiniai injektoriai, ekranuotos traukos spintos ir kt.

Rankų apšvitos rezultatai parodė, kad pirštų galiukų apšvita buvo 1,3–2,4 kartų didesnė, palyginti su dozėmis, kurios fiksuojamos įprastoje stebėsenos vietoje ir siekė 730±220 μSv/GBq, dirbant su ^{99m}Tc. Dirbant su ^{18}F, apšvitos dozės maždaug tolygiai pasiskirstė tarp abiejų rankų, vidutinė dozė buvo 39±15 μSv/GBq.

5. PACIENTŲ RADIACINĖ SAUGA IR FAKTORIAI, LEMIANTYS SULEIDŽIAMO AKTYVUMO TIKSLUMĄ

Pacientų apšvitos dozių vertinimas atliekamas vadovaujantis Lietuvos higienos normų HN 73:2018 „Pagrindinės radiacinės saugos normos“, HN 31:2021 „Radiacinės saugos reikalavimai medicininėje rentgeno diagnostikoje“, HN 77:2015 „Radiacinė sauga branduolinėje medicinoje“ reikalavimais, diagnostiniais medicininės apšvitos lygiais ir Pacientų gautos apšvitos medicininių rentgenodiagnostikos procedūrų metu vertinimo metodinėmis rekomendacijomis, patvirtintomis Radiacinės saugos centro direktoriaus 2016 m. birželio 30 d. įsakymu, arba kitomis tarptautinėmis rekomendacijomis [4, 5, 7, 9, 11, 85, 86].
Pacientų radiacinei saugai užtikrinti naudojami metodai ir priemonės:

- diagnostiniai atskaitos lygiai (DAL);
- matavimai su fantomais ir protokolų optimizavimas;
- kalibraciniai patikrinimai ir kiti bandymai.

5.1. Diagnostiniai atskaitos lygiai branduolinėje medicinoje

DAL – medicininės diagnostikos naudojamų dozių lygiai arba radiofarmacinių preparatų aktyvumo lygiai, nustatyti naudojamiems standartinio dydžio pacientų ar standartinio dydžio fantomų tipiniams tyrimams [86]. Nacionaliniai diagnostiniai atskaitos lygiai (NDAL) yra pagrindinė priemonė optimizuojant protokolus ir apsaugant pacientus nuo nepagrįsto JS poveikio. Taip pat labai svarbūs vietiniai DAL ir jų nustatymai. Atsiranda nauji skenavimo protokolai, naujos metodikos ir naujos radiofarmacinės medžiagos, naudojamos BM, keičiasi ir tobulėja skenavimo įranga, rinkoje pasirodė ir jau instaliuoti nauji SPECT skenavimo įrenginiai su CZT (kadmio cinko telūrido) detektoriais, kuriems reikalingas ypatingas dėmesys nustatant DAL ir NDAL [9, 85, 87]. CZT SPECT įranga dėl didesnės energijos skyros, padidėjusio detektavimo sistemos jautrio bei erdvinės skyros leidžia sumažinti skiriamo aktyvumo pacientams kiekį ir sutrumpinti skenavimo laiką [87, 88].

5.2. Lietuvos ASPĮ pacientams skiriamų radiofamacinių preparatų aktyvumo analizė

Siekiant atnaujinti nacionalinių DAL apšvitos dozių lygius standartinėms procedūroms, mūsų atveju į analizę buvo įtrauktos visos ASPĮ atliekamos BM procedūros. Standartinių pacientų (sveriančių 70±10 kg, tam tikrais atvejais 70±20 kg, su sąlyga, kad imties dydis didesnis nei 200 pacientų vienai procedūrai ir vidutinis visos imties pacientų svorio vidurkis 70±5 kg [86]) radiofarmacinių preparatų skiriamo aktyvumo duomenys buvo surinkti iš keturių Lietuvos ligoninių 2017–2022 m. laikotarpiu. Įtraukta dvylika dažniausiai naudojamų branduolinės medicinos diagnostikos procedūrų. Buvo įvertintas aktyvumo pasiskirstymas pagal trečiąjį kvartilį (tokiu būdu nustatoma, kad 75 % atliekamų procedūrų rekomenduojamas apšvitos lygis neviršijamas [86]), vidutinė vertė buvo naudojama nustatant NDAL. Surinkti 7979 pacientams suleistų radiofarmacinių preparatų aktyvumo verčių duomenys. Kiekvienai procedūrai, priklausomai nuo jos dažnumo, buvo atrinkta nuo 50 (retoms procedūroms) iki 530 panaudotų dozių duomenų. Remiantis surinktais duomenimis, 2022 m. buvo atnaujintos trijų procedūrų NDAL. Skiriamo pacientams aktyvumo mažiausios, didžiausios ir vidutinės dozės, medianos ir pasiskirstymo pagal trečiąjį kvartilį rezultatai pateikti 5 lentelėje. Palyginimas su kitomis šalimis pateiktas 6 lentelėje. Palyginti su kitomis šalimis, didžiausias klinikiniams procedūroms naudojamo radiofarmacinio preparato nevienodumas stebimas širdies perfuzijos, inkstų ir prieskydinių liaukų scintigrafijos tyrimų atlikimo metu.

5 lentelė. Skiriamo pacientams aktyvumo informacija.

Procedūra	Radiofarmacinis preparatas	ASPĮ skaičius	Procedūrų skaičius	Minimali vertė*	Didžiausia vertė*	Q3	Mediana	Vidurkis ± SD	DAL Lietuvoje (2017–2021)	DAL Lietuvoje po atnaujinimo
Kaulų scintigrafija	^{99m}Tc-MDP	4	2293	300	691	575,5	533	528,36±59	700	700
Inkstų scintigrafija	^{99m}Tc-DTPA Renal	3	440	134	256	203	165	177,62±29	250	250
Inkstų scintigrafija	^{99m}Tc-MAG3, ^{99m}Tc-EC renal	3	539	35	141	109	96,2	99,78±15	100	100
Prieskydinių liaukų scintigrafija	^{99m}Tc-MIBI	2	365	300	563	519	504	474,18±78	740	600

Plaučių scintigrafija	^{99m}Tc-MAA	2	453	105	213	179	161	161±21	185	185
Skydliaukės scintigrafija	^{99m}Tc Thyroid	4	604	39	135	120	111	107,66±18	150	150
Miokardo perfuzijos scintigrafija, stresas	^{99m}Tc-MIBI	2	651	145	490	316	250	270,87±77	550	550/450 CZT
Miokardo perfuzijos scintigrafija, poilsis	^{99m}Tc-MIBI	2	651	251	775	646	570	571±96	750	700/650 CZT
Neuroendokrininis vaizdinimas	^{99m}Tc octreotide	3	362	340	840	633	575,5	549,27±109	800	800
Kepenų scintigrafija	^{99m}Tc BRIDA	1	68	160	238	215	205	206,9±11	200	200
Limfoscintigrafija	^{99m}Tc Nanocolloid	3	955	10,1	168	86	69	69,62±26	200	200
Naviko tyrimas	^{18}F-FDG	2	598	150	396	320	301	301±32	500	400

*- Vertės nurodytos MBq vienetais

6 lentelė. Skiriamo pacientams aktyvumo palyginimas.

Procedūra	EU apklausa, 2014*	ARSAC (NDALs) Didžioji Britanija, 2022*	Graikijos, DRL, 2019*	Pietų Korėja, mediana, 2019*	Kroatijos, mediana, 2020*	Lietuvos 4 ASPĮ mediana*
Kaulų scintigrafija	600	600–800	735	822,4	663	572
Inkstų scintigrafija	150–540	300	540	438,7	130	160
Inkstų scintigrafija	100–370	100	-	368,5	137	99
Prieskydinių liaukų scintigrafija	400–900	900	-	691,2	555	416
Plaučių scintigrafija	150	200	180	215,2	140	170,75
Skydliaukės scintigrafija	80	80	183	214,6	185	94
Miokardo perfuzijos scintigrafija, stresas	1200 (pilnas tyrimas)	iki 1600	-	581,4	592	375
Miokardo perfuzijos scintigrafija, poilsis	1200 (pilnas tyrimas)	iki 1600	-	323,8	703	646,75
Neuroendokrininis vaizdinimas	-	-	-	-	490	620
Kepenų scintigrafija	-	150	179	287,5	223	215
Limfoscintigrafija	74–150	20 vienam limf.	-	137,6	37 vienam limf.	88
Navikų tyrimas	200–400	400	-	356,1	-	318,5

*- Vertės nurodytos MBq vienetais

Nustatant atnaujintus NDAL, matavimams buvo panaudota 14 aktyvumo matuoklių, esančių Lietuvos ligoninėse, kurie prieš tai buvo patikrinti palyginamųjų matavimų metu su antriniu standartiniu portatyviniu radionuklidų aktyvumo matuokliu Capinec CRC-15R (4π γ jonizacine kamera).

5.3. Diagnostinių protokolų optimizavimas ir vaizdų kvantifikavimas

Siekiant išvengti pacientų nepagrįstos apšvitos ir vadovaujantis ALARA principu, pacientų skenavimo protokolai turi būti optimizuoti, dozavimo ir SPECT įranga turi būti sukalibruota ir patikrinta [65, 89, 90]. Optimizavimo principas nurodo, kad JS sukelta rizika kiekvienam pacientui turi būti kuo mažesnė, todėl svarbu išgauti tinkamus parametrus, kad diagnostinis vaizdas būtų reikiamos kokybės, ir pacientas patirtų kiek įmanoma mažesnę JS apšvitą [86].

5.3.1. Kaulų scintigrafijos prokolo optimizavimas

BM vienas populiariausių tyrimų – kaulų scintigrafija, kuri leidžia įvertinti naviko metastazių kauluose išplitimą, tokių ligų ir procesų, kaip metabolinės kilmės sutrikimai, infekcijos, kraujagyslių ir kitų ligų diagnostika ir t. t. [91]. Pacientams skiriamas radiofarmacinis preparatas – techneciu žymėtas metilendifosfonatas (^{99m}Tc-MDP) ar kitas radiofarmacinis preparatas, kuris tirpalo pavidalu sušvirkščiamas į veną. Standartinis skiriamas aktyvumas ^{99m}Tc-MDP yra apie 500–1100 MBq [91, 92]. Pacientas skenuojamas su SPECT (vieno fotono emisijos kompiuterinė tomografija) praėjus maždaug 2 val. po injekcijos suleidimo.

Siekiant įvertinti ir optimizuoti skirtinguose ASPĮ naudojamos diagnostinės BM SPECT įrangos parametrus, buvo atlikti palyginamieji tyrimai su fantomais (Jaszczak apie 400 MBq ir NEMA-IEC su ~6:1 fono ir intarpų santykiu, bendras aktyvumas ~68 MBq), kurie buvo užpildyti radioaktyviąja medžiaga (^{99m}Tc). Skirtingų SPECT/KT parametrai, naudojami standartiniam klinikiniam kaulų scintigrafijos SPECT/KT tyrimui parodyti 7 lentelėje.

7 lentelė. SPECT/KT sistemų naudojami standartiniai skenavimo parametrai kaulų scintigrafijai.

Parametras ir SPECT/KT sistemos	NM/CT 870 CZT SPECT/CT	Symbia Intevo Excel SPECT/CT	AnyScan SC SPECT/CT
Kolimatorius	WEHR45	LEHR	LEGP
Matricos dydis	128x128	256x256	128x128
Padidinimas	1	1	1,14286
Detektorių konfigūracija	Du detektoriai, H	Du detektoriai, H	Du detektoriai, H
Režimas	žingsninis skenavimas, duomenų rinkimas detektorių judėjimo metu	tęstinis	tęstinis
Vaizdų skaičius	60	60	120
Energijos pusplotis	±7,5 %	±15 %	±20 %
Rekonstrukcijos algoritmas	OSEM, 4 iteracijos 10 poaibiai	xBone	OSEM, OSEM-RR

Panaudoti fantomai pavaizduoti 14 pav. Tai tipiniai fantomai, naudojami skenavimo įrangos patikrai ir gaunamų diagnostinių vaizdų analizei bei rekonstrukcijų įvertinimui.



14 pav. Jaszczak (iš kairės) ir NEMA-IEC fantomai.

Analizės rezultatai rodo, kad vaizdų, gautų iš skirtingų SPECT/KT sistemų, kokybė negali būti suvienodinta tik keičiant skenavimo parametrus ir/ar keičiant skiriamo aktyvumo kiekį pacientams. SPECT/KT sistemų vaizdų apdorojimo rekonstrukcijos ir panaudotų filtrų įtaka pateikta 8 lentelėje.

Skirtingų sistemų kontrastingumas (skirtumas tarp vaizdo sričių, atitinkančių skirtingus paciento radioaktyviųjų medžiagų įsisavinimo lygius) skiriasi nuo 11,97 iki 38,29, o erdvinė skyra (dviejų taškų atskyrimas) – nuo 6 iki 11,7.

Atlikti tyrimai parodė, jog optimizuojant kaulų scintigrafijos protokolą, naudojant NM/CT 870 CZT sistemą, reikia pailginti skenavimo laiką ir naudoti ±10 % energijos langą bei taikyti papildomus filtrus, dėl kitų sistemų reikalinga tolimesnė analizė ir pakartotini bandymai su fantomais [90, 93].

8 lentelė. Vaizdo kokybės parametrų priklausomybė nuo rekonstrukcijų ir filtrų.

	Kontrastas	Signalo ir triukšmo santykis (STS)	Erdvinė skyra, mm
SPECT sistema Symbia Intevo Excel			
OSEM	24,23	19,6	10,4
Flash3D	28,65	13,21	10,3
FBP	26,82	5,1	12,8
Wallis	33,73	3,9	11,7
AC XSPECT	38,29	10,6	7,4
SPECT sistema 870 CZT			
OSEM	28,34	13,6	7,7
AC OSEM	26,4	12	6
FBP	31,5	10,6	9,7
SPECT sistema AnyScan SC			
NAC	11,97	24	8,2
AC OSEM	29,3	24,5	7

5.3.2. Miokardo perfuzijos scintigrafijos protokolų optimizavimas

Miokardo perfuzijos scintigrafija, naudojant SPECT/CT arba specialias kardiologines gama kameras, yra vienas iš dažniausiai atliekamų širdies išeminės ligos diagnozavimo priemonių bei metodas kitoms ligoms nustatyti [94, 95]. Kadangi vis daugiau branduolinės medicinos centrų naudoja CZT SPECT/KT sistemas arba dedikuotas CZT gama kameras, kurios užtikrina iki septynių kartų didesnį sistemos jautrį palyginti su NaI(Tl) kameromis, tai leidžia optimizuoti pacientų protokolus, sumažinus apšvitos dozę ir trumpinant skenavimo laiką [95].

Dedikuotos širdies CZT gama kameros turi tam tikrų apribojimų, susijusių su vidine gama kameros architektūra, universalios CZT SPECT/KT sistemos leidžia daugiau keisti skenavimo parametrus. Tyrimo metu buvo palygintos viso kūno CZT SPECT/KT (NM/CT 870 CZT SPECT/CT) sistema su

specialia širdies CZT SPECT kamera (D-SPECT, Spectrum Dynamics), skirta miokardo perfuzijos vaizdavimui. Siekiant optimizuoti ir harmonizuoti klinikinius protokolus, buvo panaudoti fantomai. Širdies fantomas sudarytas iš dviejų dalių: 110 ml tūrio miokardo dalis užpildyta 3 MBq ^{99m}Tc ir 60 ml skilvelio dalis užoildya 0,8 MBq ^{99m}Tc (15 pav.). Panaudotas aktyvumas buvo perskaičiuotas atsižvelgiant į diagnostinio tyrimo specifiką, t. y. vertinant, kaip naudoto aktyvumo kiekis koreliuoja su standartiniam pacientui skiriamo aktyvumo dydžiu. NEMA fantomas buvo panaudotas siekiant imituoti žmogaus kūno tūrį, jis buvo užpildytas 25 MBq, taip atsižvelgiant į standartinio pacientui skiriamo aktyvumo kiekį. Palyginus dvi sistemas, nustatyti pagrindiniai STS, erdvinės skiriamosios gebos skirtumai (9 lentelė). Siekiant pagerinti SPECT/KT sistemos vaizdus, reikia naudoti papildomai KT atenuaciją ir didinti suleidžiamos pacientams naudojamos radiofarmacinės medžiagos kiekį. Optimizavimo ir harmonizavimo darbai turi būti atliekami kiekvienam įrenginiui atskirai, atsižvelgiant į rekonstrukcijos algoritmus.



15 pav. Širdies fantomas, patalpintas į NEMA-IEC fantomą.

9 lentelė. Dviejų sistemų pagrindiniai skirtumai.

Parametras ir SPECT sistemos	NM/CT 870 CZT SPECT/CT sistema	D-SPECT sistema
Pikselio dydis	6,8 mm	4,92 mm
Skenavimo laikas	11 min. 32 sek.	5 min. 10 sek.
Detektorių pozicijų skaičius	30	120
Vienos pozicijos skenavimo laikas	30 sek.	2,59 sek.
Rekonstrukcijos algoritmas	4 iteracijos, interiteracinis išlyginamasis filtras 0,125, kardiologinis filtras 1	2 iteracijos, 10 poaibių, pirminis filtras Butterworth, dažnis 0,52 pritaikant 5 vienetą

5.4. Skenavimo įrangos kalibraciniai patikrinimai ir kokybės kontrolės harmonizavimas

Kokybės užtikrinimo sistema yra privaloma siekiant užtikrinti sklandžią BM skyriaus veiklą. Pacientų skenavimo sistemos: gama kameros, SPECT/KT, PET/KT turi būti patikrintos ir atitikti gamintojų parametrus, tačiau ne visi skirtingų gamintojų matavimai yra aprašyti tarptautinėse rekomendacijose [96]. Viena iš pagrindinių užduočių – turėti visapusišką ir harmonizuotą KK programą, kuri užtikrintų vietinių ir tarptautinių rekomendacijų reikalavimų įgyvendinimą kasdieninėje veikloje [97, 98]. Atliekant klinikinius tyrimus, siekiant įvertinti gydymo atsaką naudojamos SUV (standartizuota įsisavinimo vertė), MATV (metaboliškai aktyvių navikų tūris), TLG (viso naviko glikolizė) ir kitos vertės [99]. Įvertinti šitiems naujiems indeksams reikalingas ilgalaikis tikslumas ir atkuriamumas bei matavimų harmonizavimas [99, 100]. Siekiant įsitikinti, ar naudojama skenavimo įranga kokybiškai veikia ir gaunami vaizdai tinkami klinikinėms studijoms bei vaizdų kvantifikavimui, dažniausiai atliekami kalibraciniai bandymai su IEC61675/NEMA NU2-2012 PET Image Quality Body Phantom, Jaszczak SPECT, Hoffman 3-D Brain ir kitais fantomais, kurie užpildomi tiksliai apskaičiuotu aktyvumu [99, 101, 102].

5.5. Skyriaus apibendrinimas

BM pacientams skiriamo aktyvumo atlikta detali analizė parodė, kad naudojamo ir suleidžiamo aktyvumo lygiai (mediana) didžiajai daliai procedūrų yra mažesniame lygyje palyginti su kitų šalių praktika, didžiausias išsibarstymas stebimas širdies perfuzijos scintigrafijos atliekamų tyrimų metu.

Diagnostinių protokolų optimizavimo metu atlikti tyrimai parodė, jog optimizuojant kaulų scintigrafijos protokolą, naudojant NM/CT 870 CZT SPECT sistemą, reikia padidinti skenavimo laiką (apie 10–15 %) ir naudoti ±10 % energijos langą bei taikyti papildomus filtrus ir rekonstrukcijas (OSEM). Miokardo perfuzijos scintigrafijos atveju, siekiant pagerinti SPECT/KT sistemos gaunamus vaizdus, rekomenduojama naudoti mažų dozių KT atenuacijai ir didinti suleidžiamos pacientams naudojamos radiofarmacinio praparato kiekį (apie 10–15 %) bei ilginti skenavimo laiką nuo 20 iki 25 s vienai projekcijai.

1 Priedas

Radionuklidų kalibratorių kalibravimo faktorių nustatymai.

Modelis	Radionuklidas	Kalibravimo faktorius	Šaltinių geometrija
Veenstra VDC-404	^{57}Co	380	strypas
	^{137}Cs	587	buteliukas
	^{123}I	618	buteliukas
	^{99m}Tc	236	1 ml, 2,5 ml, 3 ml, 5 ml švirkštai ir buteliukas
	^{223}Ra	587	buteliukas
Veenstra VDC-405	^{131}I	447 480	buteliukas buteliukas
	^{99m}Tc	236	1 ml, 2,5 ml, 3 ml, 5 ml švirkštai ir buteliukas
	^{137}Cs	587	buteliukas
	^{223}Ra	587	buteliukas
Veenstra VIK-202	^{99m}Tc	236	1 ml, 2.5 ml, 3 ml, 5 ml ir buteliukas
	^{137}Cs	587	buteliukas
	^{131}I	480	buteliukas
	^{177}Lu	777	buteliukas
	^{223}Ra	587	buteliukas
PITAGORA	^{137}Cs	1533,5 1528,12	buteliukas buteliukas
	^{18}F	893,3 854,3	buteliukas 5 ml švirkštas
	^{22}Na	498,8	buteliukas
PITAGORA IRIDE	^{18}F	870,5 860,435	buteliukas buteliukas
	^{137}Cs	1562,8 1544,766	buteliukas buteliukas
	^{22}Na	500,33	buteliukas
PTW CURIEMENTOR 2	^{131}I	338	buteliukas
	^{137}Cs	259	buteliukas
	^{99m}Tc	527	buteliukas
LEMER PAX ScintiDose	^{99m}Tc	0,857	1 ml, 2,5 ml, 3 ml, 5 ml švirkštai ir buteliukas
	^{137}Cs	1,36	buteliukas
	^{131}I	1,15324	buteliukas
	^{177}Lu	0,22039	buteliukas
Capintec CRC-15R	^{99m}Tc	80	1 ml, 3 ml, 5 ml švirkštai ir buteliukas
	^{137}Cs	220	buteliukas
ATOMLAB 100	^{99m}Tc	33,6	1 ml, 5 ml švirkštai ir buteliukas
	^{137}Cs	17,4	buteliukas

REZULTATŲ SANTRAUKA

Kalibruotų šulinio tipo jonizacinių kamerų (antrinio standarto) taikymas branduolinėje medicinoje leidžia tinkamai įvertinti naudojamos įrangos tikslumą bei daryti prielaidą, kad darbuotojų, pacientų ir gyventojų radiacinė sauga yra užtikrinta. Antrinių etalonų (Fidelis ir Capintec 15R), kurie buvo panaudoti šiame darbe, sietis užtikrinama dvišaliais ir trišaliais palyginimais su Čekijos metrologijos institutu dalyvaujant EURAMET projektuose. Stacionari jonizacinė kamera „Fidelis“ buvo sukalibruota Nacionalinėje fizikos laboratorijoje (NPL, Jungtinė Karalystė). Tokiu būdu užtikrinama metrologinė sietis tarp ASPĮ ir antrinių standartų laboratorijų. ASPĮ naudojamų radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių atsakas buvo stebimas nuo 2016 iki 2021 metų. Didžiausias nustatytas poslinkis buvo panašaus arba mažesnio lygio palyginus su kitų šalių patirtimi. Tyrimų metu buvo panaudoti ASPĮ radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuokliai, su kuriais buvo kalibruojami rankų TLD dozimetrai, įvertinta darbuotojų viso kūno apšvita ir įvertinta informacija apie pacientams skiriamą aktyvumą. 2017–2022 metais atlikta BM pacientams skiriamo aktyvumo detali analizė parodė, kad didžiosios dalies procedūrų metu naudojamo ir suleidžiamo aktyvumo lygiai, palyginus su kitų šalių praktika, yra mažesni. Didžiausias išsibarstymas stebimas širdies perfuzijos scintigrafijos atliekamų tyrimų metu.

Apibendrinus BM darbuotojų bei pacientų apšvitos vertinimo rezultatus, darbuotojų viso kūno apšvitos dozės ekvivalento Hp(10) ir rankų apšvitos dozės ekvivalento Hp(0,07) vertės bei pacientams skiriamo aktyvumo lygiai yra mažesni nei panašaus pobūdžio užsienio BM centruose, ypač naudojant automatines injekavimo sistemas. Siekiant optimizuoti skenavimo protokolus, reikalinga tolimesnė jų analizė atsižvelgiant į rekonstrukcijas ir taikomus filtrus.

IŠVADOS

1. Surinkus ir išanalizavus duomenis, atliktas retrospektyvus Lietuvos branduolinės medicinos darbuotojų apšvitos vertinimas ir nustatyta rizika susirgti dviejų tipų vėžiu: skydliaukės ir leukemijos. Prognozuojama jonizuojančiosios spinduliuotės poveikiui priskiriama veiksnio rizika (100 000 žmonių) yra maža – $\sim 10^{-5}$, taip pat nustatyta, kad moterų skydliaukės vėžio rizika yra 5,7 karto didesnė nei vyrų. Gauti rezultatai bus naudojami prognozuojant galimą jonizuojančiosios spinduliuotės poveikį personalui, dirbančiam branduolinės medicinos skyriuose.

2. Atliktas visų naudojamų branduolinės medicinos skyriuose radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių tikslumo įvertinimas, atsižvelgiant į naudojamus radionuklidus ir geometrijas, pritaikyti kalibraciniai koeficientai ir nustatytas prietaisų tikslumas. Didžiausias poslinkis siekė 9 % kalibraciniams, 18 % diagnostiniams ir 20 % terapiniams šaltiniams.

3. Ištirta ir įvertinta BM darbuotojų patiriama viso kūno Hp(10) ir rankų Hp(0,07) apšvita karštojoje laboratorijoje ruošiant radiofarmacinius preparatus su ^{99m}Tc, suleidžiant juos rankiniu būdu ir automatiniais injektoriais suleidžiant ^{18}F-FDG. Nustatyta, kad pirštų galiukai gauna 1,3–2,4 karto didesnę apšvitą, palyginti su dozėmis, fiksuojamomis įprastoje rankų Hp(0,07) dozimetro nešiojimo vietoje. Viso kūno Hp(10) patiriama BM personalo apšvita, dirbant su automatiniais injektoriais suleidžiant ^{18}F-FDG preparatą vienam pacientui, siekė 2,24 μSv, kuri yra mažesnė nei kitose Europos ligoninėse.

4. Atlikta suleidžiamo radiofarmacinių preparatų aktyvumo Lietuvos ASPĮ pacientams detali analizė, pasiūlyti bei atnaujinti keturi branduolinėje medicinoje taikomi diagnostiniai atskaitos lygiai (pacientų radiacinės saugos užtikrinimui naudojami dozuotės lygiai) atsižvelgiant į aktualų paskirtąjį aktyvumą ir naudojamą skenavimo įrangą.

5. Optimizuoti ir harmonizuoti diagnostiniai miokardo perfuzijos ir kaulų scintigrafijos klinikiniai protokolai dirbant su CZT SPECT skenavimo įrenginiais. Naudojant kaulų scintigrafijos protokolus su NM/CT 870 SPECT CZT sistema, turi būti naudojamas ±10 % energijos langas. Atliekant miokardo perfuzijos scintigrafijos tyrimus su NM/CT 870 SPECT CZT sistema, reikia naudoti mažų dozių KT skenavimą ir didinti suleidžiamo radiofarmacinio preparato aktyvumą.

NUMATOMA

Dauguma atliktų tyrimų bus tęsiami siekiant tiksliau įvertinti darbuotojų patiriamą JS apšvitą, dirbant naujausia BM įranga (kardiologine gama kamera, naujos kartos SPECT ir PET sistemomis) ir procedūromis, tokiomis kaip ^{166}Ho radioembolizacija, ^{177}Lu- terapija ir kt. Kadangi BM rinkoje atsiranda naujos kartos radiofarmaciniai preparatai (^{153}Sm), reikalingi tolimesni radionuklidinio ir radiocheminio grynumo tyrimai. Taip pat siekiant užtikrinti radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių matuojamų verčių sietį su etalonu, reikalingi tolimesni palyginamieji matavimai. Artimiausios ateities perspektyvų požiūriu bus atliekami šie tyrimai:

• toliau bus tęsiami radiofarmacinių preparatų (^{99m}Tc-, ^{18}F-, ^{123}I- ir kitų) radionuklidinio grynumo vertinimo darbai;

• bus tęsiama darbuotojų išorinės apšvitos stebėsena panaudojant TLD, OSL ir elektroninius dozimetrus, naudojant diagnostinius ir terapinius radionuklidus ir naujovišką skenavimo įrangą;

• bus tęsiami diagnostinių protokolų optimizavimo darbai, kai fantomų užpildymams bus panaudota tiksli radiofarmacinio preparato dozuotė ir tikrinami parametrai analizuojant skenavimo įrangos apdorojimo algoritmus.

SANTRAUKA

Disertacijos autorius nuo 2013 metų dirba medicinos fiziku Vilniaus universiteto ligoninėje Santaros klinikose, todėl turėjo galimybę panaudoti radionuklidų matavimams taikomus metrologijos metodus klinikinėje praktikoje. Dėl šios priežasties doktorantūros studijoms pasirinkta radionuklidų aktyvumo matavimo metodų taikymo branduolinėje medicinoje tematika. Kadangi branduolinės medicinos neatsiejama dalis yra radiacinė sauga, didelis dėmesys skiriamas būtent šiai tematikai. Doktorantūros metu aktyviai dalyvauta nacionalinėse bei tarptautinėse mokslinėse konferencijose, išvykose, mokymuose, buvo gauta LMT parama P-DAK-22-22 akademinei išvykai, stažuotės vieta CIEMAT (Energetikos, aplinkosaugos ir technologinių tyrimų centras, Madridas, Ispanija). 2019 metais, vykdant 2018–2019 m. TATENA nacionalinį projektą LIT6006 „Pacientų radiacinės saugos, atliekant spindulinės terapijos ir branduolinės medicinos procedūras, užtikrinimo gerinimas tobulinant valstybinę priežiūros sistemą, parengiant ir ligoninėse įdiegiant standartizuotas kokybės laidavimo ir kokybės kontrolės bandymų procedūras“, doktorantas stažavosi „Azienda Ospedaliero-Universitaria Maggiore della Carita' di“ ligoninėje Novara, Italija.

Šiame darbe ištirta ir įvertinta navikinių susirgimų rizikos tikimybė Lietuvos sveikatos priežiūros specialistų, dirbančių branduolinėje medicinoje. Pasirinktas laiko intervalas – 25 darbo metai. Įvertintas Lietuvos branduolinės medicinos skyrių naudojamų radiofarmacinių preparatų aktyvumo matuoklių poslinkis. Ypatingas dėmesys skirtas darbuotojų ir pacientų gaunamos apšvitos įvertinimui. Darbo metu buvo ištirtos branduolinės medicinos darbuotojų gaunamos viso kūno Hp(10) apšvitos dozės dirbant su automatiniais injektoriais ir atlikta rankų Hp(0,07) apšvitos detali analizė, dirbant su ^{99m}Tc ir ^{18}F radionuklidais. Atlikta pacientams skiriamo radiofarmacinių preparatų aktyvumo detali analizė ir pasiūlyti bei atnaujinti branduolinėje medicinoje taikomi vietiniai diagnostiniai atskaitos lygiai, atsižvelgiant į aktualias paskirto aktyvumo vertes.

SUMMARY

The author has been working as a medical physicist at Vilnius University Hospital Santaros Klinikos since 2013, thus there was an opportunity to apply metrology methods of radionuclide activity measurements in clinical practice.

Since radiation safety is an important part of nuclear medicine, great attention is dedicated to this part. Therefore, the topic of application of radionuclide activity measurement methods in nuclear medicine and radiation safety was chosen for doctoral studies. During the doctoral studies, PhD student actively participated in national and international scientific conferences and trainings, received a support from the Lithuanian Research Council (LMT) for P-DAK-22-22 internship at CIEMAT (Energy, Environmental Protection and Technological Research Center, Madrid, Spain). In 2019, under the IAEA national project LIT6006 "Improving the assurance of radiation safety of patients during radiation therapy and nuclear medicine procedures by improving the state care system, preparing and implementing standardized quality assurance and quality control test procedures in hospitals", PhD student completed an internship at "Azienda Ospedaliero-Universitaria Maggiore della Carita' di" at the hospital in Novara, Italy.

In the thesis, the risk probability of tumour complications among Lithuanian health care specialists working in nuclear medicine was investigated and evaluated. The time interval was chosen for over 25 working years. The non-definition of activity meters of radiopharmaceutical preparations used by Lithuanian nuclear medicine departments was also carried out. Special attention is paid to the evaluation of exposure to workers and patients. During the work, the task was to investigate the evaluation of the whole body Hp(10) exposure received by nuclear medicine workers when working with automatic injectors and to perform a detailed analysis of the Hp(0,07) exposure of the hands when working with ^{99m}Tc and ^{18}F radionuclides. A detailed analysis of the prescribed administered activity to patients was evaluated and the local diagnostic reference levels used in nuclear medicine were proposed and updated, considering the relevant assigned activities.

Introduction

In Lithuania, as in the whole world, the amount of equipment used in medical radiology increases every year, as well as the number of medical procedures performed [1, 2]. This leads to an increase of medical radiation exposure to the human population; thus, special attention must be dedicated to nuclear medicine. According to the World Nuclear Association published data in 2018, more than 40 million of nuclear medicine procedures are performed each year and this number is increasing by 5% annually [3].

Nuclear medicine is a field in which various radiopharmaceuticals are used for the diagnosis, treatment and monitoring of disease treatment response as well as for biomedical research. Nuclear medicine combines different disciplines and branches of science such as physics, biology, mathematics, information technology, chemistry, medicine and others.

Since the performance and implementation of nuclear medicine procedures is regulated by Lithuanian hygiene standards, international and local recommendations and guidelines, the accuracy of the medical equipment and calibration, issues with patients and personnel radiation exposure, and radiation safety become an increasing challenge when carrying out this type of activity, especially when implementing new technologies, applying different radiopharmaceuticals and performing new procedures.

This work discusses the principles and methods of radiation protection used in nuclear medicine, as well as metrology methods and other factors that affect the accuracy of the equipment and determine the impact of ionizing radiation on patients and workers.

The dissertation work is divided into five parts. The first part is a review of the literature on nuclear medicine and metrology-dependent processes, the methods and tools used to ensure smooth operation process in nuclear medicine. The second part is dedicated to review the accuracy of the activity meters and the importance of determining the radionuclide purity of radiopharmaceuticals. The third part describes the effects of ionizing radiation on nuclear medicine workers, their health, risk assessment, and epidemiological studies. The fourth part investigates the problem of the whole body Hp(10) and hand Hp(0.07) radiation exposure received by nuclear medicine personnel. The fifth part presents the radiation safety of patients and investigates the factors that determine the accuracy of the activity prescribed to patients, as well as the deviations and issues of quality control assessment of diagnostic equipment.

Aim and tasks

The aim of this work was to identify and evaluate the factors that depend on the applied methods of metrology in nuclear medicine field.

Tasks:

1. To investigate and evaluate the risk of tumour diseases among Lithuanian health care specialists working in nuclear medicine.

2. To perform comparative measurements of the activity meters used in Lithuanian health care hospitals and evaluate the deviation of activity meters readings.

3. To evaluate the whole-body Hp(10) radiation dose received by nuclear medicine workers, working with automatic injectors, injecting ^{18}F-FDG radiopharmaceuticals.

4. To carry out a analysis of Hp(0.07) radiation dose received by nuclear medicine workers, working with ^{99m}Tc and ^{18}F labelled radionuclides.

5. To perform an analysis of the activity prescribed to the patients of the Lithuanian hospitals and to propose and update the local diagnostic reference levels used in nuclear medicine, considering the relevant prescribed activities of radiopharmaceuticals.

The novelty of the work and the practical significance of the work

During this work, for the first time, the uncertainty and deviation of all radiopharmaceutical activity meters used in Lithuanian health care institutions were evaluated. Furthermore, for the first time, the probability of tumour disease risk among Lithuanian health care specialists working in nuclear medicine was assessed, considering the current data of the State Register of Sources of Ionizing Radiation and Occupational Exposure. New and up-to-date data on the values of activities prescribed to the patients are presented and, due to the obtained data, the diagnostic reference levels of the four most commonly performed procedures have been updated and decreased. Important data were obtained on the radiation exposure of nuclear medicine personnel working with modern shielded automatic radiopharmaceutical injection devices. New coefficients have been obtained to assess the exposure of personnel hands when working with ^{18}F-FDG radiopharmaceuticals and automatic injection systems. The conclusions are important both from a practical point of view in assessing the exposure received by workers, possible

health risks, in assessing the exposure of patients, and from a scientific point of view, as a valuable auxiliary material in the optimization of exposure. Together with other specialists, new guidelines for quality control of PET/CT and PET/MRI scanning equipment have been developed.

Statements

1. The predicted risk of developing thyroid cancer or leukaemia due to ionizing exposure of Lithuanian nuclear medicine workers is low: ~10^{-5}. Female workers had up to 5.7 times higher risk of thyroid cancer than male workers.

2. The estimated deviation level of activity meters used in the departments of nuclear medicine reaches 9% for calibration, 18% for diagnostic and 20% for therapeutic sources.

3. For the nuclear medicine workers, during preparing and injecting for ^{99m}Tc radiopharmaceuticals and administering ^{18}F-FDG by automatic injectors, the fingertips receive a 1.3-2.4 times higher dose of Hp(0.07) compared to the doses recorded at the standard position of wearing the Hp(0.07) dosimeter. Working with automatic injectors injecting ^{18}F-FDG, the whole-body radiation exposure dose of workers reaches 2.24 μSv per patient.

4. Four diagnostic reference levels used in nuclear medicine have been updated, based on the actual prescribed activities and the scanning equipment used.

5. Were optimized and harmonized clinical diagnostic protocols of myocardial perfusion and bone scintigraphy used by CZT SPECT scanning equipment in clinical practice.

Materials and Methods

1.1. Calibration of nuclear medicine equipment

According to Lithuanian Hygiene Standard HN 77:2015, the activity of all used radiopharmaceuticals must be checked with radiopharmaceutical activity meters before the prescribed activity is administered to patients. The European Union Directive 2013/59/Euratom states in article 56 are written that radiotherapy treatment must be individually planned, IAEA Safety Standards No. SSD-46, clause 4.185 states that the accuracy of injected activity for therapeutic radionuclides should be < 5% [7, 11]. In order to meet the requirements of international recommendations (uncertainty up to 10% for

diagnostic radionuclides), it is necessary to regularly check radionuclide calibrators used in nuclear medicine departments [6, 16, 18, 19]. According to EANM recommendations, when using automatic injection equipment (e.g. 18F-FDG), the deviation of the measurements should be ±3% [21].

1.2. Primary and secondary methods

Working with very small amounts of radioactive material (from Bq to kBq), primary radionuclide standardization methods are used, such as 4π β-γ coincidence proportional gas counters, triple-to-double coincidence ratios (or TDCR) counters, α proportional counters, live-timed anticoincidence counters and others [27]. The typical value of the standard uncertainty of such measurements, depending on the method, is about 0.5% [23, 28].

Since primary standardization methods take relatively longer time for measurements and are more expensive, in practice secondary methods and standards are commonly used, which can be distributed to users. Primary methods are based on decay counting and time measurement [23]. Secondary methods such as gamma spectrometry and liquid scintillation are suitable for measuring activity from several Bq to several kBq [24]. Since nuclear medicine personnel works with activities from several hundred kBq to several GBq, secondary methods such as a calibrated ionization chamber (dose calibrators), NaI(TI) systems, gamma spectroscopy [26] are used to ensure a metrological traceability in nuclear medicine divisions [25].

The Ionizing Radiation Metrology Laboratory of the FTMC that is the National Metrology Institute (NMI) in Lithuania uses two secondary standard ionization chambers with a well-mobile and stationary. The response of Lithuanian hospital activity meters, which are used for activity measurements was compared with secondary dose calibrator Capintec CRC-15R (mobile 4π γ ionization chamber) No. 158488. The mobile ionization chamber is traceable to the stationary ionization chamber Fidelis No. 06048, they are both linked by comparison with the standard of the Czech National Metrology Institute. The metrological traceability of the equipment is shown in Fig. 1.

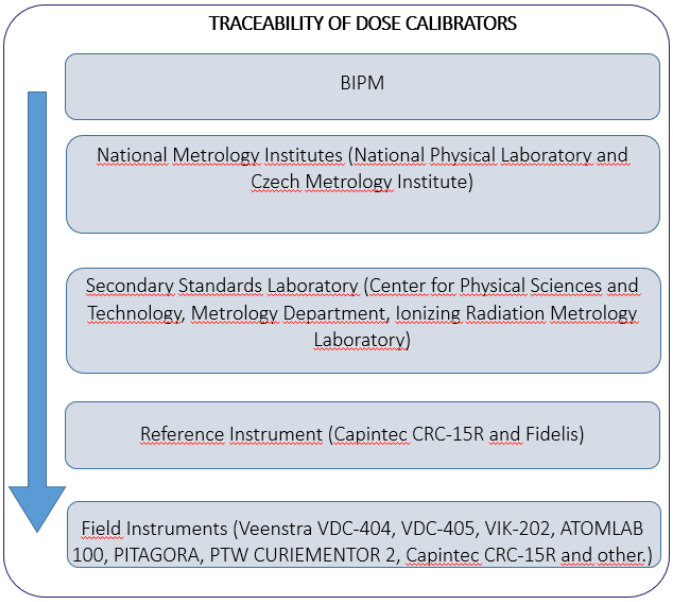


Fig. 1. The metrological traceability of the equipment.

2.1. Results of comparison measurements of radiopharmaceutical activity meters used in nuclear medicine

The accuracy evaluation of activity meters was performed from 2016 till 2021. The responses of 16 activity meters that are used in Lithuanian hospitals that provide nuclear medicine procedures with diagnostics and therapeutic radiopharmaceuticals were compared with the readings of the secondary standard chamber Capintec CRC-15R.

Sodium pertechnetate ^{99m}Tc solution measured in most commonly used different clinical measurement geometries: 1 ml, 2.5 ml, 3 ml and 5 ml syringes, 10 ml standard vacuum vials (height 50 mm, outside ⌀ 22 mm, wall thickness ~1 mm). ^{18}F was measured in standard 10 ml vials and 5 ml syringe geometries, ^{123}I was measured in standard 10 ml vial geometry. ^{131}I (sodium iodide) was measured in capsule indicated for the treatment. ^{177}Lu and ^{223}Ra were measured in standard 10 ml vial geometry. ^{18}F (^{18}F-FDG), ^{131}I (sodium iodide), ^{123}I (MIBG) and ^{223}Ra (dichloride) were used as prepared radiopharmaceuticals by manufacturers.

Measurements were done for Veenstra VDC-404, Veenstra VDC-405, Veenstra VIK-202, COMECER PITAGORA, Capintec CRC-15R, PTW – CURIEMENTOR 2, LEMER PAX ScintiDose and ATOMLAB 100 and other.

The results of the intercomparison showed that the deviation of hospital activity meters for calibration sources was up to 8.9% (n=46) for ^{137}Cs vial geometry; for ^{57}Co stick geometry was 1.4% (n=4), for ^{22}Na stick geometry was 4.7% (n=5). In general, 12 results for calibration sources were above ±5% tolerance level. The deviations for ^{99m}Tc were up to 18.3% (n=20), for ^{18}F were 8.3% (n=5), for ^{123}I a maximum deviation was found 5.3% (n=4). The largest deviation for the therapy sources was for ^{131}I in capsule and vial geometries, from 20 readings 6 showed results above ±5% tolerance level, 4 readings were above 10% level. For the ^{223}Ra vial measurements two of the seven readings were above tolerance level, -9.6% and 18%, respectively. The results for ^{177}Lu measurements (n=2) showed -1.8% and -1.6% deviation.

2.2. Radiochemical and radionuclide purity of radiopharmaceutical

In accordance with international guidelines and recommendations, the quality assurance program should cover all clinical aspects of nuclear medicine related to the smooth operation, including quality control of radiopharmaceuticals. This process is important in order to reduce risk of repeated study and misinterpretation of the images.

Determination of the radiochemical purity of radiopharmaceutical compounds in nuclear medicine practice is performed using thin-layer chromatography (TLC) or an automated chromatography system. The radiochemical purity of radiopharmaceutical compounds must be >95%, it may differ and be lower for certain radiopharmaceuticals [39, 46, 47].

The data was collected from November 2017 till February 2021 in Vilnius University Hospital Santaros Klinikos Nuclear medicine department. For estimating radionuclidic purity of a ^{99}Mo/^{99m}Tc generators (manufacturers: POLATOM POLGENTEC and GE Drytec) ^{99}Mo breakthrough test in a pertechnetate solution of ^{99m}Tc was done. ^{99}Mo assayed was measured with Veenstra VDC-405 activity meter. Also, for assessment of ^{99m}Tc purity γ spectrometry equipment of the FTMC Ionizing Radiation Metrology Laboratory was used.

For ^{99m}Tc (^{99m}Tc-MIBI; ^{99m}Tc-MAA; ^{99m}Tc-MDP; ^{99m}Tc-MAG3; ^{99m}Tc-DTPA; ^{99m}Tc-DMSA) labelled radiopharmaceuticals, radiochemical purity Biodex Tec-Control thin-layer chromatography (TLC) system was used. The Sigma-Aldrich Chemie solvents and reagents were used to perform each chromatography test. All the radiopharmaceutical preparations were performed according to manufacturer instructions.

Results of activity meter ^{99}Mo breakthrough tests of radionuclidic purity (n=192) were 0.0028±0.011%, of γ spectrometry were 0.0019±0.0018 %.

According to international guidelines and vendors recommendations, the limit allowed is 0.1% for contaminating by ^{99}Mo. Radiochemical purity results for ^{99m}Tc-MAA was 99.11±1.49% (n=14); for ^{99m}Tc-MIBI was 90.87±5.01% (n=41); for ^{99m}TC-MDP was 98.51±2.55% (n=24); for ^{99m}Tc-MAG3 was 98.11±1.29% (n=21); for ^{99m}Tc-DTPA was 97.46±2.93% (n=19); for ^{99m}Tc-DMSA was 95.73±3.85% (n=8), respectively.

3. Assessment of ionizing radiation exposure to nuclear medicine workers and cancer risk assessment

The exposure monitoring program of nuclear medicine workers working with sources of ionizing radiation is carried out consistently and systematically in Lithuania in order to ensure the safety of workers' health from the harmful effects of ionizing radiation and to reduce the likelihood of developing cancer and genetic changes [4, 5, 7, 48].

Epidemiological studies are long-term studies that examine large cohort of medical radiation workers to determine the effect of ionizing radiation exposure for certain diseases. One of the most popular methods is BEIR VII risk assessment model.

One of the main tasks of this study was to analyse the dynamics of radiation doses received by occupationally exposed medical radiation workers in Lithuania hospitals with nuclear medicine services. Reconstruction and analysis of the individual occupational exposure doses to medical radiation workers within a time span between 1992 and 2017 was performed using the data taken from the National Register of Sources of Ionizing Radiation and Occupational Exposure. A pool of 2059 average annual effective doses corresponding to 272 job positions occupied by nuclear medicine and radiology workers for a certain time period over 26 years in five Lithuanian hospitals was analysed.

It was found that the risk was primarily influenced by gender, exposure dose and working period. The highest risk was estimated for the workers employed at radiation medicine department from 1992 up to 2017. The occupational exposure of workers dealing with radionuclides can increase the probability of thyroid cancer development by several times. Estimated LAR for female workers varied between 3×10^{-5} and 26×10^{-5} and was up to 5.7 times higher in comparison with males.

4. Assessment of whole body Hp(10) and hand Hp(0.07) exposure to nuclear medicine workers

Occupational exposure assessment for nuclear medicine personnel includes whole body Hp(10) and hand Hp(0.07) measurements and exposure assessments, eye exposure monitoring may sometimes be used for Hp(3) personnel performing radiopharmaceutical preparation work in a hot laboratory and working with therapeutic activities [59].

Monitoring of occupational exposure is usually carried out with passive dosimeters: films, thermoluminescent dosimeters (TLD), radiophotoluminescent glass dosimeters, optically stimulated luminescence dosimeters (OSL), direct ion storage dosimeters DIS (Direct Ion Storage Dosimeter) and others [61, 62].

Occupational exposure monitoring in nuclear medicine is carried out by measuring and evaluating external exposure with passive and active dosimeters, internal exposure is measured using NaI(Tl) and HPGe detectors.

4.1. Results of Hp(10) exposure of nuclear medicine workers

Personal electronic dosimeters (EPD) POLIMASTER PM1610B-01 were used for long-term monitoring of workers' exposure and assessment of received exposure. Measured EPD data were analysed for medical physicists, radiology technologists and administrative staff from 2014 till 2018. For dispensing and injecting ^{18}F-FDG, COMECER IRIDE automatic injection system and the automatic fractionator ALTHEA with wireless injection system WIS were used. The occupational exposure was evaluated during different processes: such as radiopharmaceutical arrival, activity preparation, dispensing, injection, patient positioning, discharge and compare the radiation doses received using automated infusion system with automatic fractionator and hot cell system for syringes with wireless injection device.

The results reveal that radiology technologists who perform injection procedures, regardless of the automatic infusion system, received the highest radiation exposure doses. The average doses to the radiology technologists per one study were 1.72±0.33 μSv and 1.16±0.11 μSv with ALTHEA/WIS and IRIDE system, respectively. The average dose for accompanying the patient to the PET/CT scanner and scan procedure was 0.52±0.07 μSv. For the medical physicists, the average dose was 0.29±0.09 μSv. The measured dose for administrative staff was 0.30±0.15 μSv.

4.2. Results of Hp(0.07) exposure of nuclear medicine workers

The operation processes and responsibilities of the nuclear medicine personnel includes different processes such as preparing patients for examinations and treatment, checking and preparing for work of scanning equipment, preparing and injecting radiopharmaceuticals, performing quality control of radiopharmaceuticals, handling radioactive waste, etc. During the listed processes, the highest exposure of nuclear medicine personnel is obtained when working with open radioactive sources and their environment, during the preparation and injection of radiopharmaceutical preparations, especially when performing different actions with therapeutic radionuclides [79, 80].

For monitoring the exposure of workers and assessing the received exposure when working with radiopharmaceuticals labelled with ^{18}F and ^{99m}Tc TLD-100 dosimeters were used. Dosimeters were calibrated using ^{18}F and ^{99m}Tc sources in the (0.25-2) mSv and (0.5-4) mSv ranges, respectively, and read with a RIALTO TLD (NE Technology) reader. The places of wearing TLD dosimeters are shown in Fig. 2.

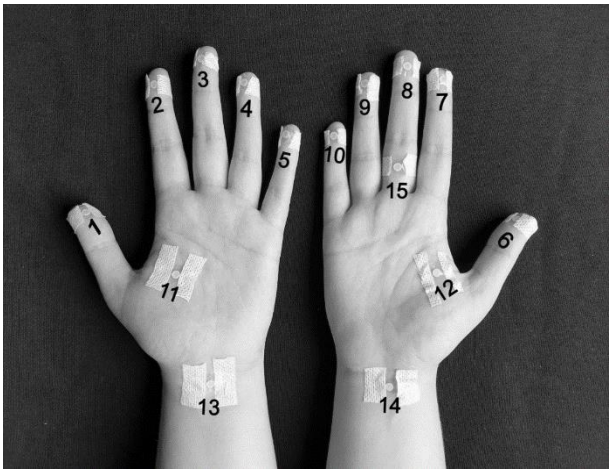


Fig. 2. TLD dosimeters positions.

Research has shown that when working with ^{99m}Tc radiopharmaceuticals, the right (dominant) hand received up to 2.2 times the radiation dose compared to the left (non-dominant) hand. During the work in the "hot laboratory" with ^{99m}Tc radiopharmaceuticals, the highest average dose was measured for the tip of the right thumb (average dose was 0.73±0.22 mSv/GBq). When working with ^{18}F, the radiation doses were approximately equally distributed between both hands, the highest radiation dose (Fig. 3.) was determined for the tip of the thumb of the right hand (average dose was 39±15 μSv/GBq).

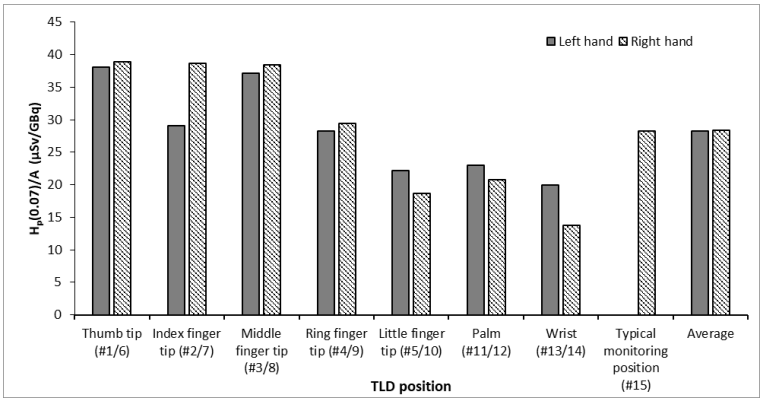


Fig. 3. Dose distribution of different TLD positions while working with ^{18}F-FDG.

5. Radiation safety of patients and factors determining accuracy of injected activity

Methods and tools used to ensure radiation safety of patients:

• Diagnostic reference levels (DAL);

• Measurements with phantoms and protocol optimization;

• Calibration checks and other tests.

DRL – dose reference levels used in medical diagnostics or activity levels of radiopharmaceuticals for typical studies using standard-sized patients or standard-sized phantoms [86]. National Diagnostic Reference Levels (NDRL) are a key tool for optimizing protocols and protecting patients from undue exposure to ionizing radiation.

Since a new scanning protocols, methodologies and radiopharmaceuticals used in nuclear medicine appear, as well as, scanning equipment changes and improves, new SPECT scanning devices with CZT (cadmium zinc telluride semiconductor material) detectors appear, special attention is needed in determining DRL and NDRL [9, 85, 87].

5.1. Results of an analysis of the activity prescribed to the patients

In order to update NDAL values for standard procedures, the activity data of radiopharmaceuticals administered to standard patients (weighing 70±10 kg, in some cases 70±20 kg, provided that the sample size is greater than 200 patients per procedure and the average weight of the entire sample of patients

is 70±5 kg [86] were collected from four Lithuanian hospitals for 2017-2022 period. Twelve commonly used nuclear medicine diagnostic procedures were selected. The distribution of activity was evaluated according to the third quartile was evaluated, and the median value was used to determine the NDRL. Data collected for 7979 activity values for patients. For each procedure, depending on its frequency, between 50 (for rare procedures) and 530 used dose data were selected. Based on the collected data, in 2021 NDRLs for three procedures were updated.

5.2. Optimization of diagnostic protocols, quantification of images and calibration checks

To avoid unnecessary patient exposure and to follow the principle of ALARA (as low as reasonably achievable), patient scanning protocols should be optimized, dosage and SPECT equipment should be calibrated and verified [65, 89, 90].

The quality assurance system is mandatory in order to ensure the smooth operation of the nuclear medicine department. Patient scanning systems: gamma cameras, SPECT/CT, PET/CT must be tested and meet the parameters of the manufacturers, but certain measurements of different manufacturers are not described in international recommendations [96]. One of the main tasks is to have a comprehensive and harmonized quality control program that would ensure the implementation of the requirements of local and international recommendations in daily activities.

For optimization purpose different phantoms can be used: IEC61675/NEMA NU2-2012 PET Image Quality Body Phantom, Jaszczak SPECT, Hoffman 3-D Brain and other [99, 101, 102].

Conclusions

1. For the first time, a retrospective assessment of the exposure of Lithuanian nuclear medicine workers was carried out and the risk of developing two types of cancer was determined: thyroid and leukaemia. The predicted risk is low, ~10^{-5}, however, it was also found that the risk of thyroid cancer for women was 5.7 times higher than for men. The obtained results will be used to predict the potential harmful exposure effect of ionizing radiation to personnel working in nuclear medicine departments.

2. For the first time, an assessment of the accuracy of all radiopharmaceutical activity meters used in nuclear medicine departments was carried out, considering used radionuclides, volumes and geometries, calibration coefficients were applied and the deviation of the devices was determined. The maximum deviation was up to 8.9% for calibration, 18.3% for diagnostic and 20.1% for therapeutic sources.

3. Whole-body Hp(10) and hands Hp(0.07) exposure received by nuclear medicine personnel while working with ^{99m}Tc in a hot laboratory during preparation of radiopharmaceuticals, manual injection and working with automatic injectors injecting ^{18F}-FDG was investigated and evaluated. It was found that fingertips receive 1.3-2.4 times higher exposure compared to the doses recorded in the standard hands Hp(0.07) dosimeter wearing position. Whole body Hp(10) exposure received by radiology technologist during dispensing and administration ^{18}F-FDG and working with automatic injectors was up to 2.24 μSv per one patient examination.

4. A detailed analysis of the activities used for administered of radiopharmaceutical to patients at Lithuanian hospitals was carried out, four diagnostic reference levels applied in nuclear medicine were proposed and updated, considering the actual prescribed radiopharmaceutical activities and the scanning equipment used for diagnostic procedures.

5. Optimized and harmonized diagnostic protocols of myocardial perfusion and bone scintigraphy considering the emergence of CZT SPECT scanning equipment in clinical practice. For bone scintigraphy protocols, a ±10% energy window should be used with the NM/CT 870 SPECT CZT system. For the NM/CT 870 SPECT CZT system, using the myocardial perfusion scintigraphy protocol, additional CT attenuation must be used.

PADĖKA

Nuoširdžiai dėkoju:

Mokslo darbo vadovui dr. Arūnui Gudeliui už vadovavimą, pasitikėjimą, palaikymą ir supratingumą visu mokslinio darbo laikotarpiu.

Vilniaus universiteto ligoninės Santaros klinikų Klinikinės radiacinės priežiūros skyriaus vedėjai Doc. Dr. Birutei Gricienei už pateiktas vertingas pastabas ir pasiūlymus rengiant mokslinius straipsnius.

Vilniaus universiteto ligoninės Santaros klinikų Radiologijos ir branduolinės medicinos centro Branduolinės medicinos skyriaus kolektyvui už pagalbą renkant duomenis ir atliekant eksperimentus.

Šeimai, draugams ir kolegoms už palaikymą ir kantrybę.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2020/2021 Report to gneral assembly, Volume I
2. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Healthcare_resource_statistics_-_technical_resources_and_medical_technology (Accessed 10 December 2022).
3. WNA, 2019. World Nuclear Association. <http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/radioisotopes-in-medicine.aspx>. (Accessed 6 March 2021).
4. Lietuvos HN 77:2015 „Radiacinė sauga branduolinėje medicinoje“, 2002 m. gruodžio 17 d. įsakymu Nr. 642.
5. Lietuvos higienos norma HN 73:2018 „Pagrindinės radiacinės saugos normos“, patvirtinta Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministro 2001 m. gruodžio 21 d. įsakymu Nr. 663.
6. Carey, J. E., Byrne, P., DeWerd, L., Lieto, R. and Petry, N. The selection, use, calibration, and quality assurance of radionuclide calibrators used in nuclear medicine. Report No. 181. (College Park, MD: Ameri-can Association of Physicists in Medicine) (2012) ISSN: 0271-7344.
7. IAEA. Radiation protection and safety in medical uses of ionizing radiation. (Vienna, Austria: Specific Safety Guide No. SSG-46) (2019).
8. EFOMP’S Guideline Quality Controls in PET/CT and PET/MR, version 02.03.2022.
9. Skovorodko, K., Komiagienė, R., Maciusovič, M., Gilys, L., Vajauskas, D., Grigonienė, V., Žiliukas, J., Raudonienė, J., Gricienė, B. Nationwide survey on radiation doses received by patients in nuclear medicine imaging procedures. J. Radio. Prot., 42 (3) (2022) DOI 10.1088/1361-6498/ac8202
10. Prince, J. F., van den Bosch, M.A.A.J, Nijsen, J., Smits, M., van den Hoven, A.F., Nikolakopoulos, S., Wessels, F.J., Bruijnen, R., Braat, M., Zonnenberg, B., Lam, M. Efficacy of Radioembolization with 166Ho-Microspheres in Salvage Patients with Liver Metastases: A Phase 2 Study. J Nucl Med. 2018 Apr;59(4):582-588. doi: 10.2967/jnumed.117.197194. Epub 2017 Sep 15. PMID: 28916623.
11. Delpassand, E.S, Tworowska, I., Esfandiari, R., Torgue, J., Hurt, J., Shafie, A., Núñez, R. Targeted α-Emitter Therapy with 212Pb-DOTAMTATE for the Treatment of Metastatic SSTR-Expressing

Neuroendocrine Tumors: First-in-Humans Dose-Escalation Clinical Trial. J Nucl Med. 2022 Sep;63(9):1326-1333. doi: 10.2967/jnumed.121.263230. Epub 2022 Jan 6. PMID: 34992153; PMCID: PMC9454455.

12. Ahenkorah, S., Cassells, I., Deroose, C.M., Cardinaels, T., Burgoyne, A.R., Bormans, G., Ooms, M., Cleeren, F. Bismuth-213 for Targeted Radionuclide Therapy: From Atom to Bedside. Pharmaceutics 2021, 13, 599.
13. 2013 m. gruodžio 5 d. Tarybos direktyva 2013/59/Euratomas, kuria nustatomi pagrindiniai saugos standartai siekiant užtikrinti apsaugą nuo jonizuojančiosios spinduliuotės apšvitos keliamų pavojų ir panaikinamos direktyvos 89/618/Euratomas, 90/641/Euratomas, 96/29/Euratomas, 97/43/Euratomas ir 2003/122/Euratomas.
14. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52010DC0423&from=CS (Accessed 5 January 2023).
15. McCready, V.R. Radioiodine – the success story of Nuclear Medicine. Eur J Nucl Med Mol Imaging 44, 179–182 (2017). https://doi.org/10.1007/s00259-016-3548-5
16. Busemann, S.E,, Płachcínska, A., Britten, A. EANM Physics Committee. Acceptance testing for nuclear medicine instrumentation. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2010 Mar;37(3):672-81. doi: 10.1007/s00259-009-1348-x. PMID: 20135120.
17. Dash, A., Chakravarty, R.. Radionuclide generators: the prospect of availing PET radiotracers to meet current clinical needs and future research demands. Am J Nucl Med Mol Imaging. 2019 Feb 15;9(1):30-66. PMID: 30911436; PMCID: PMC6420712.
18. IAEA, 2006. Quality Assurance for Radioactivity Measurement in Nuclear Medicine. International Atomic Energy Agency, Technical Reports Series No. 454, Vienna, Austria.
19. Gadd, R., Baker, M., Nijran, K.S., Owens, S., Thomas, W., Woods, M.J., et al., 2006. Protocol for establishing and maintaining the calibration of medical radionuclide calibrators and their quality control. Measurement Good Practice Guide No. 93. Teddington: National Physical Laboratory.
20. Sun, Z. Review: production of nuclear medicine radioisotopes with ultra-intense lasers. AIP Adv., 11 (2021), pp. 1-17, 10.1063/5.0042796
21. Boellaard, R., Delgado-Bolton, R.J.G., Oyen, W., Giammarile, F., Tatsch, K. et al., 2015. FDG PET/CT: EANM procedure guidelines for tumour imaging: version 2.0. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 42, 328–354. https://doi.org/10.1007/s00259-014-2961-x

22. Vargas, C.S., Pérez, S.R., Baete, K., Pommé, S., Paepen, J., Van Ammel, R., Struelens, L., 2018. Intercomparison of 99mTc, 18F and 111In activity measurements with radionuclide calibrators in Belgian hospitals. Physica Medica. 45, 134-142. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2017.12.011
23. GrauMalonda, A., Grau Carles, A., Chapter 7 - Radionuclide standardization. Handbook of Radioactivity Analysis: Volume 2 (Fourth Edition) Radioanalytical Applications 2020, Pages 531-625. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814395-7.00007-6
24. Gudelis, A., Radionuklidų aktyvumo vieneto – Bq – valstybinis etalonas. Energetika, Vol 61 No 1 (2015) https://doi.org/10.6001/energetika.v61i1.3096
25. Lietuvos Respublikos metrologijos įstatymas.
26. Zimmerman, B.E., Judge, S. Traceability in nuclear medicine, Metrologia, 44 (4) (2007), pp. S127-S132 DOI:10.1088/0026-1394/44/4/S16
27. Bergeron, D.E., Fitzgerald, R. Monte Carlo modelling of live-timed anticoincidence (LTAC) counting for Cu-64. Applied Radiation and Isotopes. Volume 134, April 2018, Pages 280-285 https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.09.032
28. Pommé, S., Methods for primary standardization of activity. Published 2 August 2007, Metrologia, Volume 44, Number 4 DOI 10.1088/0026-1394/44/4/S03
29. Handbook of Radioactivity Analysis (Fourth Edition) Volume 1: Radiation Physics and Detectors 2020, Pages 575-801
30. Broda, R., Pochwalski, K., Radoszewski, T. Calculation of liquid-scintillation detector efficiency. Appl. Radiat. Isot. 39, 159 (1988) https://doi.org/10.1016/0883-2889(88)90161-X
31. Gaigalaitė, L., Gudelis, A. TDCR įrenginio stabilumo tyrimas 42-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija, tezės.
32. Veenstra Instruments, 2014. VIK-202 user manual. Version 1.08, for hardware revision 2.00 and higher, document code: VIK202-MNL-01-EN.
33. Živanović, M,Z., Vukanac, I., Samac, J., Vojislav, A., Jeremic. V., Janković, D., Kandić, A., Saldarriaga, C., Vargas, L., Struelens, O., Bjelac, C. (2022). Intercomparison and performance assessment of radionuclide calibrators used in nuclear medicine departments in Serbia.. Applied Radiation and Isotopes, 179:110013-110013. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.110013

34. Wallbrink, P.; Walling, D.E.; Quili, H. Radionuclide Measurement Using HPGe Gamma Spectrometry. In Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2007; pp. 67–96
35. IAEA-TECDOC-1856. (2018). Quality Control in the Production of Radiopharmaceuticals. Vienna: IAEA.
36. Bailey, D.L., Humm, J.L., Todd-Pokropek, A. Nuclear Medicine Physics. A Handbook for Teachers and Students. IAEA, Vienna, 2014. ISBN 978–92–0–143810–2.
37. IAEA Safety Standards Series No. GSG-7 Occupational Radiation Protection.
38. Principles and Practice of PET/CT Part 1 A Technologist‘s Guide. European Association of Nuclear Medicine EANM Technologist Committee. SBN: 978-3-902785-00-8
39. Europe, C.o. (2013).European Pharmacopoeia. Strasbourg: Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare of the Council of Europe (EDQM).
40. Bauwens, M., Pooters, I., Cobbe, R., Visser, M., Schnerr, R., Mottaghy, F., Wildberge, J., Wierts, R. 2019. A comparison of four radionuclide dose calibrators using various radionuclides and measurement geometries clinically used in nuclear medicine. Physica Medica 60, 14-21. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2019.03.012
41. Dimcheva, M., Trindev, P. 2016. First results of checking the performance of dose calibrators in medical units in Bulgaria. Scientific works of the Union of Scientists in Bulgaria-Plovdiv, series G. Medicine, Pharmacy and Dental medicine, Vol. XIX, ISSN 1311-9427, Medicine and Dental medicine.
42. Sanderson, T., Solomon, J., Nottage, C., Dickson, J., 2019. Underestimation of 68Ga PET/CT SUV caused by activity overestimation using default calibrator settings. Physica Medica 59, 158–162. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2019.03.006
43. EURAMET, 2016. Euramet TC Project Nr. 1243 “The interlaboratory comparison of the radionuclide calibrators”. Final report.
44. EURAMET, 2019. Euramet TC Project Nr. 1437 “The follow-up interlaboratory comparison of the radionuclide calibrators”. Final report.
45. Maioli, C., Lucignani, G., Strinchini, A., Tagliabue, L., Del Sole, A. Quality control on radiochemical purity in Technetium-99m radiopharmaceuticals labelling: three years of experience on 2280 procedures. Acta Biomed, Vol. 88, 2017. N. 1: 49-56

46. https://www.polatom.pl/wp-content/uploads/2021/07/Radiofarmaceuticals-catalogue-1.pdf. (Accessed 5 January 2023)
47. Straub, M., Leresche, M., Pilloud, C., Dvynck, F., Stritt, N., & Hesselmann, R. (2018). A new-strip TLC method for the quality control of technetium-99m mercaptoacetyltriglycine (99mTc-MAG3).
48. Radiacinės saugos centro metinė ataskaita, ISSN 2351-5953, 2017.
49. Adliene, D., Griciene, B., Skovorodko, K., Laurikaitiene, J., Puiso, J. 74 exposure of health professionals and cancer risk assessment for Lithuanian nuclear medicine workers. Environ Res. 2020 Apr;183:109144. doi: 10.1016/j.envres.2020.109144. Epub 2020 Jan 18. PMID: 32028181.
50. Lee, W.J, Choi, Y., Ko, S., Cha, E.S., Kim, J., Kim, Y.M,, Kong, K.A, Seo, S., Bang, Y.J., Ha, Y.W. Projected lifetime cancer risks from occupational radiation exposure among diagnostic medical radiation workers in South Korea. BMC Cancer. 2018 Dec 4;18(1):1206. doi: 10.1186/s12885-018-5107-x. PMID: 30514249; PMCID: PMC6278159.
51. Bernier, M., Doody, M., Van Dyke, M.E., et al., Work history and radioprotection practices in relation to cancer incidence and mortality in US radiologic technologists performing nuclear medicine procedures, Occupational and Environmental Medicine 2018;75:533-561.
52. Ko, S., Chung, H.H., Cho, S.B., et al., Occupational radiation exposure and its health effects on interventional medical workers: study protocol for a prospective cohort study. BMJ Open 2017; 7:e018333. doi: 10.1136/bmjopen-2017-018333
53. Wang, f., Sun, Q., Wang, J., Yu, N. Risk of developing cancers due to low-dose radiation exposure among medical X-ray workers in China-results of a prospective study. Int J Clin Exp Pathol 2016, 9 (11) (2016), pp. 11897-11903 ISSN:1936-2625/IJCEP0031563
54. Effects of Ionizing Radiation-Volume I: Report to the General Assembly, Scientific Annexes A and B. UNSCEAR 2006 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation United Nations, New York (2008), United Nations sales publication E.08.IX.6
55. N.R. Council. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2 The National Academies Press, Washington, DC (2006)
56. International Commission on Radiological Protection: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. Ann ICRP 2007; 37: pp. 1-332.

57. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR): UNSCEAR 2006 Report. Effects of ionizing radiation. Annex A: epidemiological studies of radiation and cancer.
58. Radiation Risk Assessment Tool https://irep.nci.nih.gov/radrat (Accessed 10 January 2020)
59. Wrzesień, M. et al 2018 J. Radiol. Prot. 38 763 DOI 10.1088/1361-6498/aabef5
60. Radiacinės saugos centro 2021 metų veiklos ataskaita, Radiacinės saugos centras (2021)
61. European Commission. Radiation protection No 160. Technical Recommendations for Monitoring Individuals Occupationally Exposed to External Radiation, 2009
62. https://mirionprodstorage.blob.core.windows.net/prod-20220822/cms4_mirion/files/pdf/spec-sheets/dosimetry-system.pdf?1523761377
63. Lietuvos higienos norma HN 112:2001 „Vidinės apšvitos monitoringo reikalavimai“, patvirtinta Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministro 2001 m. liepos 17 d. įsakymu Nr. 389.
64. IAEA Safety Standards Series No. GSG-7 Occupational Radiation Protection, 2018.
65. Isabelle Nilsson, Jakob Himmelman, Jehangir Khan, Johanna Dalmo, The potential to use tld measurements to validate the occupational radiation protection at the department of nuclear medicine, Radiation Protection Dosimetry, Volume 195, Issue 3-4, October 2021, Pages 355–362, https://doi.org/10.1093/rpd/ncab085
66. https://www.landauer.com/sites/default/files/product-specification-file/Escort_0.pdf (Accessed 12 January 2023).
67. Yukihara, E., Andrade, A., Eller, S. (2016) Beo Optically Stimulated Luminescence Dosimetry Using Automated Research Readers. Radiat Meas 94:27–34 https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2016.08.008
68. Radiacinės saugos centro direktoriaus 2007 m. lapkričio 16 d. įsakymas Nr. 63 „Dėl Apšvitą patiriančių darbuotojų apšvitos ir darbo vietų stebėsenų atlikimo taisyklių patvirtinimo“.
69. Urbonienė A, Žiliukas J, Branduolinės medicinos darbuotojų išorinės apšvitos stebėsena, „Visuomenės sveikata”, 2012.
70. http://www.hpschapters.org/northcarolina/NSDS/18FPDF.pdf (Accessed 12 January 2023).
71. https://nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/Radionuclide-Information-Booklet-2016-eng.pdf

72. Skovorodko, K., Bareikė, M., Gudelis, A., Gricienė, B. Occupational exposure in a PET/CT facility using two different automatic infusion systems. Phys Med 2020;7:169–75. doi: 10.1016/j.ejmp.2020.08.014
73. Pavičar, B., et al. Nuclear medicine staff exposure to ionising radiation in 18F-FDG PET/CT practice: a preliminary retrospective study Arh Hig Rada Toksikol 2021;72:216-224 DOI: 10.2478/aiht-2021-72-3517
74. Donmoon, T., et al. Radiation exposure to nuclear medicine staffs during 18F-FDG PET/CT procedures at Ramathibodi Hospital. 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 694 012061 DOI 10.1088/1742-6596/694/1/012061
75. Guillet, B., Quentin, P., Waultier, S., Bourrelly, M..Pisano, P. and Mundler, O. Technologist Radiation Exposure in Routine Clinical Practice with 18F-FDG PET. J Nucl Med Technol 2005. 33:175–179.
76. Li, W., Fang, L., Li, J. Exposure Doses to Technologists Working in 7 PET/CT Departments. Dose Response. 2020 Jul 9;18(3):1559325820938288. doi: 10.1177/1559325820938288. PMID: 32694961; PMCID: PMC7350403.
77. Mattsson, S., Söderberg, M. Radiation dose management in CT, SPECT/CT and PET/CT techniques, Radiation Protection Dosimetry, Volume 147, Issue 1-2, September 2011, Pages 13–21, https://doi.org/10.1093/rpd/ncr261
78. Elshami, W., Elshami, R., Uslu, A.M, et al. Occupational radiation dose assessment for nuclear medicine workers in Turkey: a comprehensive investigation. J. King Saud Univ. Sci. (2022), 10.1016/j.jksus.2022.102005
79. Kaljevic, J., Stankovic, K., Stankovic, J., Ciraj-Bjelac, O., Arandjic, D. Hand dose evaluation of occupationally exposed staff in nuclear medicine, Radiation Protection Dosimetry, Volume 170, Issue 1-4, September 2016, Pages 292–296, https://doi.org/10.1093/rpd/ncv500
80. Leide-Svegborn, S. External radiation exposure of personnel in nuclear medicine from 18F, 99mTC and 131I with special reference to fingers, eyes and thyroid, Radiation Protection Dosimetry, Volume 149, Issue 2, April 2012, Pages 196–206, https://doi.org/10.1093/rpd/ncr213
81. Andriulevičiūtė, I. Evaluation of Hand Exposure for Nuclear Medicine Staff Working with 18F- and 99mTc- Labelled Radiopharmaceuticals, Master's Final Degree Project, Kaunas University of Technology, 2021
82. Sans, M. Merce, N., Ruiz, I., Barth, A., Carnicer, L., Donadille, P., Ferrari, M., Fulop, M., Ginjaume, G., Gualdrini, S., Krim, F., Mariotti, X. Ortega, A., Rimpler, F., Vanhavere, S. Baechler, Extremity exposure in nuclear medicine: preliminary results of a European study, Radiation

Protection Dosimetry, Volume 144, Issue 1-4, March 2011, Pages 515–520, https://doi.org/10.1093/rpd/ncq574
83. Lietuvos darbuotojų, dirbančių su jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniais ar jų aplinkoje, atskirų profesijų grupių 2016 metų individualiųjų dozių analizės ir vertinimo ataskaita, RSC, 2016.
84. Andriulevičiūtė, I., et al 2022 J. Radiol. Prot. 42 031510 DOI 10.1088/1361-6498/ac89f9
85. ICRP 2017 Diagnostic reference levels in medical imaging. ICRP publication 135 Ann. ICRP 46 1–144
86. Pacientų gautos apšvitos medicininių rentgenodiagnostikos procedūrų metu vertinimo metodinės rekomendacijos, RSC, 2016.
87. Santarelli, M.F,, Mori, A., Bertasi, M., Positano, V., Gimelli, A., Scipioni, M., Marzullo, P., Landini, L. CZT Detectors-Based SPECT Imaging: How Detector and Collimator Arrangement Can Determine the Overall Performance of the Tomograph. Electronics. 2021; 10(18):2230. https://doi.org/10.3390/electronics10182230
88. IAEA HUMAN HEALTH SERIES No. 37, Nuclear Medicine Resources Manual, 2020 Edition
89. IAEA Safety Standards, for protecting people and the environment, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, General Safety Requirements Part 3, No. GSR Part 3, 2014
90. http://lnfk.ftmc.lt/wp-content/uploads/2021/10/LNFK44-P24_1-Kirill-Skovorodko-Fiziniu-ir-technologijos-mokslu-centras.pdf (Accessed 14 January 2023).
91. Wyngaert T. Van Den., Strobel K., Kampen W. U., et al. The EANM practice guidelines for bone scintigraphy Eur J Nucl Med Mol Imaging 43:1723–1738. (2016).
92. Bartel, T.B., Kuruva, M., Gnanasegaran, G., Beheshti, M, Cohen, E.J, Weissman, A.F, Yarbrough, T.L. SNMMI Procedure Standard for Bone Scintigraphy 4.0. J Nucl Med Technol. 2018 Dec;46(4):398-404. PMID: 30518604.
93. Skovorodko, K., Maciusovič, M., Burkanas, M., Tiškevičius, S., Gilys, L., Komiagienė, R., Venius, J. Towards harmonization of clinical bone scintigraphy protocol between three different SPECT/CT systems in Lithuania. Medical Physics in the Baltic States (2021). ISSN 1822-5721
94. https://www.conference-expert.eu/en/bcr2022/en/abstract-book/4/O-T12-04
95. Gimelli, A., Achenbach, S., Buechel, R.R., Edvardsen, T., Francone, M. et al. EACVI Scientific Documents Committee, Strategies for radiation

dose reduction in nuclear cardiology and cardiac computed tomography imaging: a report from the European Association of Cardiovascular Imaging (EACVI), the Cardiovascular Committee of European Association of Nuclear Medicine (EANM), and the European Society of Cardiovascular Radiology (ESCR), European Heart Journal, Volume 39, Issue 4, 21 January 2018, Pages 286–296, https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehx582

96. Grigonienė, V., Skovorodko, K., Miciusovic, M., Urbanaviciute, R., Gilys, L., Griciene, B. Implementation of nuclear medicine quality assurance programme in lithuanian hospitals. MEDICAL PHYSICS IN THE BALTIC STATES, 14th conference, Kaunas, Lithuania, 2019.
97. Roberta Matheoud., et al. FOMP's Protocol Quality controls in PET/CT and PET/MR. Physica Medica, Volume 105, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2022.11.010
98. RSC, 2017–2023 metų gyventojų ir darbuotojų, dirbančių su jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniais, apšvitos stebėsenos programos 2021 metų ataskaita.
99. Vallot, D., De Ponti, E., Morzenti, S. et al. Evaluation of PET quantitation accuracy among multiple discovery IQ PET/CT systems via NEMA image quality test. EJNMMI Phys 7, 30 (2020). https://doi.org/10.1186/s40658-020-00294-y
100. Boellaard R. The engagement of FDG PET/CT image quality and harmonized quantification: from competitive to complementary. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2015;43:1–4.
101. Aide, N., Lasnon, C., Veit-Haibach, P. et al. EANM/EARL harmonization strategies in PET quantification: from daily practice to multicentre oncological studies. Eur J Nucl Med Mol Imaging 44 (Suppl 1), 17–31 (2017). https://doi.org/10.1007/s00259-017-3740-2
102. EANM Technologists' Guide, RADIONUCLIDE THERAPY MANAGEMENT, 2022. DOI: https://doi.org/10.52717/CUUN1001

PUBLIKACIJŲ IR KONFERENCIJŲ SĄRAŠAS

Straipsniai žurnaluose:

1. D. Adliene, B. Griciene, **K. Skovorodko**, J. Laurikaitiene, J. Puiso. Occupational radiation exposure of health professionals and cancer risk assessment for Lithuanian nuclear medicine workers. Environmental Research, Volume 183, April 2020, 109144.
https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109144

2. **K. Skovorodko,** M. Bareikė, A. Gudelis, B. Gricienė. Occupational exposure in a PET/CT facility using two different automatic infusion systems. Physica Medica, Volume 77, 2020, p. 169-175.
https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.08.014

3. **Kirill Skovorodko**, Arūnas Gudelis, A NATIONAL SURVEY OF TRACEABILITY OF ACTIVITY METERS IN LITHUANIAN HOSPITALS, Radiation Protection Dosimetry, Volume 198, Issue 12, August 2022, Pages 870–876.
https://doi.org/10.1093/rpd/ncac140

4. **K Skovorodko**, R Komiagienė, M Maciusovič, L Gilys, D Vajauskas, V Grigonienė, J Žiliukas, J Raudonienė and B Gricienė. Nationwide survey on radiation doses received by patients in nuclear medicine imaging procedures. Journal of Radiological Protection, Volume 42, Number 3, 42, 2022, 031507.
https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac8202

5. Inga Andriulevičiūtė, **Kirill Skovorodko**, Diana Adlienė, Augustinas Bielinis, Jurgita Laurikaitienė and Birutė Gricienė. Assessment of extremity exposure to technologists working manually with ^{99m}Tc-labelled radiopharmaceuticals and with an automatic injection system for ^{18}F-FDG. Journal of Radiological Protection, Volume 42, Number 3, 42, 2022, 031510.
https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac89f9

6. Roberta Matheoud, Ronald Boellaard, Lucy Pike, Jaroslav Ptacek, Gabriel Reynés-Llompart, Marine Soret, Stefaan Vandenberghe, Alessandra Zorz, Peter Julyan, Ivo Rausch, Bernhard Sattler, Sanchez-Garcia Manuel, Giovanni Tosi, Giovanni Tosi, Kostantinos Dalianis, Pedro Miguel Dinis Almeida, Cinzia Fabbri, Joanna Gawel, Panayiotis Hadjitheodorou, Maria Kotzasarlidou, Thiago Viana Miranda Lima, Jim O'Dohertyv, **Kirill Skovorodko**, Dmitri Sutov, Ahmed Taher, Marco Valenti, Eleonora Vanzi. EFOMP's Protocol Quality controls in PET/CT and PET/MR. Physica Medica, Volume 105, 2023.
https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2022.11.010

Konferencijų medžiaga:

1. **K. Skovorodko**, M. Maciusovič, M. Burkanas, S. Tiškevičius, L. Gilys, R. Komiagienė, J. Venius. Towards harmonization of clinical bone scintigraphy protocol between three different SPECT/CT systems in Lithuania. Medical Physics in the Baltic States (2021). ISSN 1822-5721

2. I. Andriulevičiūtė, **K. Skovorodko**, J. Laurikaitienė, B. Gricienė. Assessment of extremity exposure for nuclear medicine personnel. Medical Physics in the Baltic States (2021). ISSN 1822-5721

3. A.Gudelis, I. Gorina, P. Dryak, Z. Vesela, A. Javornik, M. Krivosik, J. Ometakova, **K. Skovorodko**, The follow-up intercomparison of the radionuclide calibrators between FTMC, CMI and SMU. 22nd International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications (ICRM 2019), Salamanca, Spain, p. 52-55. ISSN 2522-4328

4. **K. Skovorodko**, A. Gudelis. Measurements traceability through comparisons: results of five radionuclide dose calibrators. Medical Physics in the Baltic States (2019), p. 20-22. ISSN 1822-5721.

5. V. Grigonienė, **K. Skovorodko**, M. Miciusovic, R. Urbanaviciute, L. Gilys, B. Griciene. Implementation of nuclear medicine quality assurance programme in lithuanian hospitals. Medical Physics in the Baltic States (2019), p. 15-19. ISSN 1822-5721.

Pranešimai mokslinėse konferencijose:

1. **K. Skovorodko,** M. Kurminas, I. Andriulevičiūtė, R. Komiagienė. Dosimetry aspects of Holmium-166 radioembolization. The 19th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics, Liepaja, Latvija, 2023.
2. **K. Skovorodko.** Metrologijos taikymas branduolinėje medicinoje ir radiacinėje saugoje. FTMC metinė mokslinė konferencija, 2023, Vilnius, Lietuva.
3. **K. Skovorodko,** B. Griciene, I. Andriulevičiūtė. Assessment of Extremity Exposure during ^{18}F-FDG Injection with Automatic Injection System. Abstracts and Posters of International Conference on Occupational Radiation Protection: Strengthening Radiation Protection of Workers – Twenty Years of Progress and the Way Forward. Ženeva, Šveicarija. 2022.

4. **K. Skovorodko.** Our experience in assessment of occupational exposure in nuclear medicine and future perspectives. Baltic Congress of Radiology Talinas, Estija, 2022.
5. **K. Skovorodko**, M. Maciusovič, M. Burkanas, S. Tiškevičius, L. Gilys, R. Komiagienė, J. Venius. Towards harmonization of clinical bone scintigraphy protocol between three different SPECT/CT systems in Lithuania. MEDICAL PHYSICS IN THE BALTIC STATES, 15th conference, Kaunas, Lithuania, 2021.
6. **K. Skovorodko**, A. Bielinis, A. Gudelis. Optimization and quantification of clinical bone scintigraphy protocol. LNFK-44 Lithuanian National Conference on Physics, Vilnius, Lithuania, 2021.
7. **K.Skovorodko**. Occupational exposure assessment using automatic injectors and optimization of occupational exposure in nuclear medicine. LMT Jaunųjų mokslininkų konferencija. BIOATEITIS gamtos ir gyvybės mokslų perspektyvos. Vilnius, Lithuania, 2020.
8. **K. Skovorodko**. 99mTc RADIONUKLIDINIO GRYNUMO NUSTATYMO METODŲ PALYGINIMAS, (FTMC) doktorantų ir jaunųjų mokslininkų konferencija FizTech2020. Vilnius, Lithuania, 2020.
9. **K. Skovorodko**, A. Gudelis. Measurements traceability through comparisons: results of five radionuclide dose calibrators. MEDICAL PHYSICS IN THE BALTIC STATES, 14th conference, Kaunas, Lithuania. 2019.
10. V. Grigonienė, **K. Skovorodko**, M. Miciusovic, R. Urbanaviciute, L. Gilys, B. Griciene. Implementation of nuclear medicine quality assurance programme in lithuanian hospitals. MEDICAL PHYSICS IN THE BALTIC STATES, 14th conference, Kaunas, Lithuania, 2019.
11. **K. Skovorodko**, R. Urbanavičiūtė. International Symposium on Trends in Radiopharmaceuticals (ISTR-2019) IAEA. Implementation of a quality assurance program and quality control results of radiopharmaceuticals, Vienna, Austria, 2019.
12. **K. Skovorodko**, A. Gudelis. Intercomparison of radionuclide calibrators used in the main Lithuanian hospitals with the secondary standard ionization chamber. LNFK-43 Lithuanian National Conference on Physics, Kaunas, Lithuania, 2019.
13. **K. Skovorodko**, B. Griciene, A. Gudelis. „Current Status of Quality Assurance for Radionuclide Dose Calibrators and Results of Quality Control“. 7th Baltic Congress of Radiol., Kaunas, Lithuania, 2018.
14. **K. Skovorodko**, A. Gudelis. Long-term quality control and intercomparison results of radionuclide dose calibrators. European Congress of Medical Physics, Copenhagen, Denmark, 2018.

Populiarinimo darbai:

1. Skaitytas pranešimas:

   2022-11-11. K. Skovorodko. „Šiandienos aktualijos ir pasiekimai branduolinėje medicinoje bei ateities perspektyvos“. Renginys: Medicinos fizikų draugijos seminaras „Šiandienos aktualijos ir pasiekimai“, LSMUL Kauno klinikų filialas Onkologijos ligoninė, Volungių g. 16, Kaunas.

2. 2022-09-11 Straipsnyje paminėtas K.Skovorodko. https://www.santa.lt/naujienos/santaros-zinios-pirma-karta-baltijos-ir-siaures-europos-salyse-pacientas-gydytas-nauju-metodu/

3. Skaityta paskaita:
   2022-02-11, K. Skovorodko. „Branduolinės medicinos apšvita ir jos valdymas“. Renginys: Particle Therapy Masterclass 11 February 2022, Kaunas University of Technology, Vilnius University, National Cancer Institute, Lithuania.

4. Straipsnis žiniasklaidoje: „International Medical Physics day: an occasion to promote the profession to Lithuania public“, EMP News Winter 2020. https://www.efomp.org/uploads/256dafbb-32f5-4aa3-910b-8b6165a0c66a/EFOMP%20Newsletter%20winter2020_final.pdf
   Parengta kartu su B. Griciene.

5. Skaitytas pranešimas: „Terapiniai radionuklidai branduolinėje medicinoje: dabartinės ir ateities perspektyvos“ (2019 m. kovo 22 d.,Nacionalinio vėžio instituto Mokslinių tyrimų centras, P. Baublio g. 3B, Vilnius).

GYVENIMO APRAŠYMAS

Kirill Skovorodko gimė 1985 metų birželio mėn. 13 d. Vilniuje. 2004 metais baigė Vilniaus Lukiškių vidurinę mokyklą. 2009 metais baigė Vilniaus uniersiteto biofizikos bakalauro studijas ir Vilniaus teisės ir verslo kolegijos reklamos vadybos profesenį bakalaurą. 2013 metais baigė Vilniaus universiteto medicinos fizikos magistro studijas. 2017 metais pradėjo doktorantūros studijas Fizinių ir technologijos mokslų centre.

ABOUT THE AUTHOR

Kirill Skovorodko was born in Vilnius on June 13, 1985. In 2004, he graduated Vilniaus Lukiškių secondary school. In 2009, he completed biophysics bachelor's studies in Vilnius University and completed profesional bachelor`s studies of advertisment management in Vilnius law and manangment collegue. In 2012, he graduated medical physicist master studies in Vilnius University. In 2017, he started his doctoral studies at the Center for Physical Science and Technology.

UŽRAŠAMS

Vilniaus universiteto leidykla
Saulėtekio al. 9, III rūmai, LT-10222 Vilnius
El. p. info@leidykla.vu.lt, www.leidykla.vu.lt
bookshop.vu.lt, journals.vu.lt
Tiražas 20 egz.