



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Laima Pilkytė

RADIONUKLIDŲ SAVITOJO AKTYVUMO STATYBINĖSE
MEDŽIAGOSE LIETUVOJE EKSPERIMENTINIS TYRIMAS, JŲ
SUKELTOS APŠVITOS MODELIAVIMAS IR VERTINIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, aplinkos inžinerija ir kraštotvarka – 04T

VILNIUS, 2006

Disertacija rengta 2002 – 2006 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Donatas Butkus (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija ir kraštotvarka – 04T).

Konsultantai

habil. dr. Petras Vaitiekūnas (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija ir kraštotvarka – 04T),

dr. Gendrutis Morkūnas (Radiacinės saugos centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

IVADAS	5
1. Gamtinės ir dirbtinės kilmės radionuklidai statybinėse medžiagose ir jų sukelta gyventojų apšvita patalpose	10
1.1. Gamtinė apšvita. Apšvitos šaltiniai, kuriuose yra gamtinės kilmės radionuklidų	10
1.2. Gamtinės ir dirbtinės kilmės radionuklidai statybinėse medžiagose	15
1.2.1. Gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose	15
1.2.2. Radono išsiskyrimas iš statybinių medžiagų	22
1.2.3. Statybinių medžiagų tarša dirbtinės kilmės radionuklidais	28
1.2.4. Gamybos procesų atliekų panaudojimo statybinių medžiagų gamybai problemos	30
1.2.5. Apšvitos nuo radionuklidų, esančių statybinėse medžiagose, jonizuojančiosios spinduliuotės dozės	33
1.3. Apšvitos nuo radionuklidų, esančių statybinėse medžiagose, jonizuojančiosios spinduliuotės ribojimas ir mažinimas	38
1.3.1. Apšvitos ribojimo principai. Reikalavimai radionuklidų savitiesiems aktyvumams statybinėse medžiagose įvairiose šalyse	38
1.3.2. Apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozių įvertinimo būdai	49
1.4. Matavimo metodų apžvalga	53
1.5. Radionuklidų statybinėse medžiagose jonizuojančiosios spinduliuotės sukeltos apšvitos modeliavimas	56
1.6. Išvados ir tolesnio darbo uždaviniai	60
2. Tyrimų metodai, medžiagos ir priemonės	62
2.1. Statybinių medžiagų klasifikavimas galimos apšvitos nuo jose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės požiūriu	62
2.2. Statybinių medžiagų bandinių atrinkimas ir paruošimas tyrimams	64
2.3. Gama spektrometriniai tyrimai	65
2.4. Radono tūrinių aktyvumų patalpose matavimas	71
2.5. Ore sugertosios dozės galios matavimai patalpose	72
2.6. Apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės modeliavimas	73
2.7. Išvados	77
3. Tyrimų ir modeliavimo rezultatai, jų aptarimas	78
3.1. Gama spektrometrinių tyrimų rezultatai ir statybinių medžiagų klasifikavimas radiologiniu požiūriu	78
3.1.1. Radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose	78
3.1.2. Statybinių medžiagų klasifikavimas radiologiniu požiūriu	85
3.2. Statistinė statybinių medžiagų gama spektrometrinių tyrimų rezultatų analizė	91
3.3. Gamtinės kilmės radionuklidai archeologiniuose statybinių medžiagų bandiniuose	98
3.4. Ore sugertosios dozės galios ir radionuklidų savitojo aktyvumo statybinėse medžiagose ryšys	102
3.5. Ore sugertosios dozės galia ir radono tūrinis aktyvumas patalpose	110

3.6. Apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės modeliavimas	119
3.7. Išvados.....	141
BENDROSIOS IŠVADOS.....	142
REKOMENDACIJOS	143
Literatūra.....	144

IVADAS

Problema

Svarbiausi žmogaus apšvitos šaltiniai yra radono patalpose, radionuklidų, esančių grunte ir statybinėse medžiagose, jonizuojančioji spinduliuotė bei kosminė spinduliuotė. Iš visų radionuklidų, esančių maiste, didžiausia apšvita yra nuo ^{40}K jonizuojančiosios spinduliuotės. Visa tai rodo, kad net ir dabar, kai apšvitos šaltiniai yra ir į aplinką patekę dirbtinės kilmės radionuklidai bei medicininės procedūros, kuriose naudojama jonizuojančioji spinduliuotė, gamtinė spinduliuotė paprastai yra svarbiausias apšvitos šaltinis.

Radiacinės saugos optimizavimo principas reikalauja, kad dozės, kurias gauna žmonės, ir švitinamų žmonių skaičius būtų tokie maži, kokius įmanoma pasiekti protingomis priemonėmis, atsižvelgiant į socialines ir ekonomines sąlygas. Optimizavimo principo dalimi yra ir esamų bei galimų apšvitos būdų ir šaltinių identifikavimas. Jau daugelį metų Jungtinių Tautų Mokslinė komisija jonizuojančiosios spinduliuotės poveikiui tirti (angl. *United Nations Scientific Commission on Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR*) renka duomenis apie įvairius – tiek gamtinės, tiek dirbtinės – kilmės žmogaus apšvitos šaltinius visame pasaulyje. Tuo siekiama ne tik nustatyti šių šaltinių svarbą atskiruose regionuose, šalyse ir visame pasaulyje, bet ir padėti surasti būdus žmonių apšvitai mažinti. Apšvitos šaltinių identifikavimas, apšvitos nuo jų dozių nustatymas, dėsningumų, pagal kuriuos kinta ir pasiskirsto šios dozės, ištyrimas yra labai svarbus radiacinės saugos optimizavimo etapas. Priemonių, kurios naudojamos šiems tikslams pasiekti, įvairovė nuolat didėja. Viena svarbiausių to priežasčių – mokslinių tyrimų, kuriais siekiama analizuoti apšvitos šaltinius, metu gauti rezultatai ir nustatyti dėsningumai.

Žmogaus apšvitos šaltinių ir su jais susijusių dėsningumų analizė yra aktualus jonizuojančiosios spinduliuotės poveikio tyrimų ir optimizuotų apsaugos nuo jonizuojančiosios spinduliuotės priemonių paieškos elementas. Šio elemento svarba priklauso nuo tiriamojo apšvitos šaltinio, todėl pastaraisiais metais gamtinė apšvita, kaip didžiausios apšvitos šaltinis, yra vis daugiau ir daugiau tiriama. Intensyviai atliekami apšvitos nuo kosminės spinduliuotės, radono patalpose, gamtinės kilmės radioaktyviųjų medžiagų ir radionuklidų, esančių statybinėse medžiagose, jonizuojančiosios spinduliuotės tyrimai.

Temos aktualumas

Vienas svarbiausių žmogaus apšvitos šaltinių yra radionuklidai statybinėse medžiagose. Tai yra gamtinės kilmės radionuklidai – ^{226}Ra , ^{232}Th ir jų skilimo produktai bei ^{40}K . Nors yra užregistruota atvejų, kai į statybines medžiagas patenka ir dirbtinės kilmės radionuklidai

(pavyzdžiui, netyčia išlydžius į metalo laužą patekusį jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinį ir iš gauto metalo pagaminus gelžbetonio konstrukcijas), didžiausią įtaką apšvitai turi šie trys gamtinės kilmės radionuklidai ir jų skilimo produktai.

Gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose gali būti įvairūs. Jie priklauso nuo šių radionuklidų aktyvumų statybinių medžiagų žaliavose ir gamybos technologijos. Paskutiniuoju metu šios problemos aktualumas ėmė didėti, nes statybinių medžiagų gamybai, siekiant, kad jos įgautų tam tikrų savybių, imama naudoti naujos žaliavos, neretai pramonės atliekos. Šiose žaliavose gali būti dideli gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai. Kartais į statybinės medžiagas dideli gamtinės kilmės radionuklidų kiekiai patenka statybinių medžiagų gamybai naudojant medžiagas, atsiradusias pramonėje, kurioje naudojamos arba perdirbamos gamtinės kilmės radioaktyviosios medžiagos.

Visa tai rodo, kad yra svarbu kontroliuoti radionuklidų savituosius aktyvumus statybinėse medžiagose. Tačiau statybinių medžiagų asortimentas yra didelis, ir jis nuolat plečiasi, todėl labai svarbu kuo paprastesniais būdais identifikuoti statybinės medžiagas, kuriose radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė gali sukelti didelę žmonių apšvitą.

Apšvita priklauso ne tik nuo radionuklidų savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose (jų jonizuojančiosios spinduliuotės intensyvumo), bet ir nuo šių medžiagų kiekių pastatuose, jų išdėstymo žmogaus atžvilgiu. Todėl didelę reikšmę turi apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozių skaičiavimas. Šis aspektas ypatingą reikšmę įgyja tada, kai būtina įvertinti, ar radiacinės saugos požiūriu optimalu naudoti statybinės medžiagas, kuriose aptikti dideli radionuklidų savitieji aktyvumai, tačiau šie aktyvumai dar nėra tokie, kad leistų daryti vienareikšmę išvadą apie statybinių medžiagų netinkamumą naudoti.

Svarbi yra ir radono, išsiskiriančio iš statybinių medžiagų, problema. Nors daugeliu atvejų pagrindinis radono šaltinis patalpose yra gruntas, kai kada didžiausia radono dalis išsiskiria iš statybinių medžiagų.

Įvertinus apšvitą nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės bei šios apšvitos kitimo ir formavimosi dėsningumus, galima sukurti apsaugos nuo šios apšvitos optimizavimo sistemos pagrindus, t.y. numatyti priemones, kurių būtina imtis, kad apšvita nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės būtų optimaliai maža.

Svarbus yra dar vienas šios problemos aspektas. Apšvita nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės veikia visus žmones, todėl visuomenės susidomėjimas šia problema vis didėja. Kiekvienas žmogus turi teisę gauti informaciją apie savo aplinką. Todėl greiti ir patikimi apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų

jonizuojančiosios spinduliuotės įvertinimo būdai padėtų išspręsti visuomenės švietimo ir informavimo apie jonizuojančiosios spinduliuotės poveikį problemą.

Darbo tikslai

1. Nustatyti ir įvertinti radionuklidų savituosius aktyvumus tipinėse statybinėse medžiagose.
2. Įvertinti radionuklidų, esančių statybinėse medžiagose, jonizuojančiosios spinduliuotės sukeltas apšvitos dozes įvairių konstrukcijų patalpose.

Darbo uždaviniai

1. Nustatyti statybinių medžiagų klasifikavimo pagal apšvitą principus ir identifikuoti statybines medžiagas, kuriose esančių radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė gali sukelti didžiausią apšvitą.
2. Išmatuoti radionuklidų savituosius aktyvumus parinktose statybinėse medžiagose ir nustatyti tipinius radionuklidų savituosius aktyvumus Lietuvoje gaminamose ir naudojamose statybinėse medžiagose.
3. Įvertinti statybines medžiagas kaip radono patalpose šaltinį, nustatant išorinės apšvitos dėl radono skilimo produktų jonizuojančiosios spinduliuotės dozes patalpose.
4. Apskaičiuoti ir sumodeliuoti išorinės apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozes.
5. Rekomenduoti priemonės žmonių apšvitai patalpose nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės optimizuoti.

Darbo mokslinis naujumas

Iki šiol Lietuvoje radionuklidų savitieji aktyvumai buvo nustatomi tik atskirose statybinėse medžiagose. Šiame darbe išnagrinėtos ne atskiros statybinės medžiagos, bet jų visuma, nustatant radionuklidų savituosius aktyvumus mūsų šalyje gaminamose ir naudojamose tipinėse statybinėse medžiagose bei įvertinant išorinės ir vidinės apšvitos ypatumus iš įvairių statybinių medžiagų pastatytuose namuose. Pirmą kartą statybinės medžiagos suklasifikuotos išorinės apšvitos, kurią gali lemti jose esančių radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė, požiūriu. Nustatyta radono įtaka sugertosios dozės galiai patalpose. Ištirti radionuklidų savitieji aktyvumai archeologinių statybinių medžiagų bandiniuose.

Darbe pateikiami kompleksinių radionuklidų savitųjų aktyvumų tipinėse statybinėse medžiagose ir iš tų statybinių medžiagų pastatytų namų patalpose apšvitos tyrimo, vertinimo, mažinimo ir modeliavimo rezultatai.

Praktinė darbo reikšmė

Pagrindinis žmogaus apšvitos šaltinis yra gamtinė spinduliuotė. Tačiau šiuo metu didesnis dėmesys yra skiriamas apsaugai nuo žmogaus sukurtų šaltinių, ypač atominės energetikos ir radioaktyviųjų atliekų. Tuo pažeidžiamas radiacinės saugos optimizavimo principas, kadangi rezervų mažinti gamtinę apšvitą dar yra labai daug. Statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės sukelta apšvita irgi gali ir turi būti kontroliuojama. Šiuo darbu atkreipiamas dėmesys į minėtą problemą, siekiant „atstatyti“ pusiausvyrą tarp dėmesio, skiriamo gamtinės ir dirbtinės kilmės apšvitos šaltiniams.

Pažymėtina, kad ne visada yra aiški riba tarp gamtinės ir dirbtinės kilmės apšvitų. Statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės sukelta apšvita gali būti laikoma ir dirbtine, nes radionuklidų kiekis jose priklauso nuo žmogaus veiklos – technologinių procesų, žaliavų, gamtinės kilmės radionuklidai statybinėse medžiagose yra koncentruojami.

Darbe išanalizuoti statybinių medžiagų radionuklidų aktyvumo rodiklio, naudojamo įvertinti statybinių medžiagų tinkamumui radiacinės saugos požiūriu, nustatymo aspektai. Šios analizės ir atlikto apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozių modeliavimo rezultatai panaudoti kuriant optimizuotą ir lanksčią statybinių medžiagų įvertinimo radiacinės saugos požiūriu schemą.

Darbe pateikiami duomenys gali padėti įvertinti apšvitos nuo įvairiose statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozes, o tai padidintų žmonių, dirbančių patalpose, pastatytose iš įvairių medžiagų, matuojamų dozių tikslumą.

Ginamieji teiginiai

1. Statybinės medžiagos gali būti klasifikuojamos pagal radionuklidų, esančių jose, jonizuojančiosios spinduliuotės sukeltas apšvitos dozes.
2. Sugertosios dozės galia patalpose siejasi su radionuklidų, esančių statybinėse medžiagose, savitaisiais aktyvumais.

3. Egzistuoja statistiškai patikimas skirtumas tarp sugertosios dozės galios ore pastatuose, pastatytuose iš plytų, betono bei medžio, o taip pat daugiabučiuose ir individualiuose namuose.

Darbo apimtis ir struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, 3 pagrindiniai skyriai, darbo išvados ir rekomendacijos. Nuorodos duotos į 172 šaltinius, pateiktas 18 autorės publikacijų disertacijos tema sąrašas. Yra 157 puslapiai teksto, 57 paveikslai ir 37 lentelės.

1. Gamtinės ir dirbtinės kilmės radionuklidai statybinėse medžiagose ir jų sukelta gyventojų apšvita patalpose

1.1. Gamtinė apšvita. Apšvitos šaltiniai, kuriuose yra gamtinės kilmės radionuklidų

Žmonės nuolat yra švitinami įvairių jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinių. Pagal savo kilmę šie šaltiniai skirstomi į sukurtus žmogaus (dirbtinės kilmės) ir gamtinius (gamtinės kilmės).

Pirmajai grupei priklauso tie šaltiniai, kuriuos sukūrė žmogus – medicinoje naudojami šaltiniai, šaltiniai, kurie įvairiems tikslams naudojami pramonėje, transporte, moksliniuose tyrimuose. Prie dirbtinės kilmės šaltinių priskiriami ir radionuklidai, į aplinką patekę veikiant atominėms elektrinėms ir kitiems branduolinio kuro ciklo įrenginiams, bei radionuklidai, aplinkoje atsidūrę branduolinio ginklo bandymų bei atominių elektrinių avarijų metu.

Gamtinės kilmės šaltiniai yra tie, kurių kilmė yra gamtinė. Toks skirstymas yra sąlyginis ir problematiškas. Yra nemažai šaltinių, kurių kilmė yra gamtinė, tačiau jie yra sukurti žmogaus, pavyzdžiui, šiam koncentruojant gamtinius radionuklidus. Vienas iš tokių šaltinių pavyzdžių gali būti ^{226}Ra , kuris iki atsirandant branduoliniams reaktoriams ir greitintuvams, dabar naudojamiems dirbtinės kilmės radionuklidams gaminti, buvo plačiai naudojamas medicinoje, pramonėje, netgi plataus vartojimo gaminiuose. (IAEA Nr. 620, 1991) pateiktais vertinimais, iki šeštojo dešimtmečio pabaigos, kai nustota gaminti ^{226}Ra , visame pasaulyje išskirta apie 4,5 kg šio radionuklido. Savo kilme būdamas gamtinis, ^{226}Ra vis dėlto buvo koncentruojamas žmonių, todėl tokie šaltiniai laikomi dirbtinės kilmės.

Kitas radionuklidų koncentravimo pavyzdys yra gamtinės kilmės radioaktyviosios medžiagos – medžiagos, kuriose dėl technologinių arba kitokių procesų padidėjo gamtinės kilmės radionuklidų – ^{238}U , ^{232}Th grandinių narių arba ^{40}K savitieji aktyvumai. Nors šie aktyvumai padidėjo žmogaus veiklos dėka, apšvita nuo gamtinės kilmės radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės yra laikoma gamtine (IAEA Nr. 419, 2003).

Panašiai yra ir su radono patalpose, statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės, kosminės spinduliuotės skrendančiuose lėktuvuose sąlygota apšvita.

Todėl nustatant, kokiai apšvitai priskirti vieną ar kitą šaltinį, vadovaujamosi ir kitais kriterijais, pavyzdžiui būdai, kuriais ši apšvita kontroliuojama. Vienas svarbiausių apšvitos kontrolės būdų – veiklos, kurios metu arba dėl kurios žmonės veikia apšvita, licencijavimas, yra taikomas dirbtinės kilmės jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniams.

Kitas svarbus kriterijus, nustatant gamtinės ar dirbtinės kilmės yra šaltinis, yra tai, kaip sudėtinga šį šaltinį ir apšvitą nuo jo kontroliuoti. Gamtinės apšvitos šaltiniams priskiriami tie šaltiniai, kurių kontroliuoti neįmanoma (pavyzdžiui, kosminė spinduliuotė žemės paviršiuje ar

^{40}K spinduliuotė žmogaus kūne) arba tie, kuriuos kontroliuoti yra sunku (pavyzdžiui, radonas patalpose). Be to, pastarojo kriterijaus reikšmė kinta – atsiranda poreikis ir galimybės kontroliuoti tokius šaltinius, kurie anksčiau kontroliuojami nebuvo. Vienas to pavyzdžių – radionuklidai statybinėse medžiagose.

Remiantis aukščiau paminėtais kriterijais, šiuo metu pasaulyje yra priimta apšvitos šaltinių klasifikavimo sistema. Pagal ją gamtinės kilmės šaltiniams priskiriama kosminė spinduliuotė, gamtinės kilmės radionuklidai, esantys grunte, vandenyje, maiste ir kituose žmogų supančiuose objektuose, statybinėse medžiagose bei žmogaus kūne, radonas patalpose, kosmogeniniai radionuklidai (UNSCEAR, 2000).

Kosminė spinduliuotė Žemę pasiekia iš kosmoso ir Saulės. Tai yra didelės energijos spinduliuotė, kuri sąveikaudama su Žemės atmosfera, sukuria įvairių kitų rūšių jonizuojančiąją spinduliuotę ir kosmogeninius radionuklidus. Vidutinė pasaulio gyventojų apšvitos nuo kosminės spinduliuotės metinė efektinė dozė yra 0,38 mSv (UNSCEAR, 2000). Ši dozė priklauso nuo geografinės platumos ir aukščio virš jūros lygio. Kosminės spinduliuotės intensyvumas priklauso ir nuo Saulės aktyvumo, tačiau jūros lygyje ir aukščiuose, artimuose šiam lygiui, Saulės aktyvumo kitimas įtakos kosminės spinduliuotės intensyvumui neturi.

Skraidančiuose lėktuvuose dozės galia dėl šios spinduliuotės yra tokia, kad metinė lėktuvų įgulų dozė dėl jos gali viršyti 1 mSv (Morkūnas, 2003), (Wilson, 2000). Radiacinės saugos priemonių kosminės spinduliuotės atžvilgiu gali tekti imtis tik lėktuvuose, kurie skraido aukščiau kaip 8000 m (Higienos norma HN 85-2003). Žemiau skraidančių lėktuvų įgulos per metus gauti 1 mSv ar didesnės efektinės dozės negali.

Pagrindiniai kosmogeniniai radionuklidai, t. y., radionuklidai, nuo kurių spinduliuotės gaunamos didžiausios dozės, yra ^3H ir ^{14}C . Tačiau šios dozės, palyginus su apšvitos nuo kitų gamtinės kilmės radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozėmis, yra mažos (nuo ^3H spinduliuotės – 0,03 μSv per metus, nuo ^{14}C – 0,15 μSv) (UNSCEASR, 2000).

Iš ne kosmogeninės kilmės gamtinių radionuklidų (jie dar vadinami Žemės plutos radionuklidais) didžiausią įtaką turi vadinamieji pirminiai radionuklidai (radionuklidai, kurie susiformavo kartu su Visata (Magill, 2003)) – ^{40}K , uranas ^{238}U ir toris ^{232}Th . Kitų gamtinės kilmės radionuklidų, pavyzdžiui, ^{87}Rb , ^{138}La , ^{147}Sm , ^{176}Lu ir ^{235}U grandinės radionuklidų kiekiai gamtoje yra tokie maži, tad jų įtaka žmogaus gaunamai dozei yra maža (UNSCEAR, 2000).

Gamtiniai radionuklidai yra Žemės plutoje, statybinėse medžiagose, ore, vandenyje, maiste ir žmogaus kūne. Skiriasi tik jų kiekiai. Nuo kai kurių šaltinių žmogaus apšvita yra palyginti vienoda visur ir visiems. Tokios apšvitos pavyzdys gali būti apšvita nuo ^{40}K , esančio maiste ir žmogaus kūne, spinduliuotės. Apšvitos nuo kitų radionuklidų jonizuojančiosios

spinduliuotės dozės labai priklauso nuo gyvenamosios vietos, urano ir torio kiekių skirtinguose gruntuose.

Labai svarbus žmogaus apšvitos šaltinis yra radonas patalpose (Bochicchio, 1996), (Takriti, 2003), (Kullab, 2005). Vidutiniškai pasaulyje nuo radono patalpose žmonės gauna 1 mSv (UNSCEAR, 2000), tačiau šis apšvitos šaltinis pasižymi dideliu netolygumu – žymiai skiriasi atskirų šalių vidurkiai ir dar daugiau – mažesnių regionų vidurkiai ir radono tūriniai aktyvumai atskiruose namuose. Tokius skirtumus sąlygoja tiek radono šaltiniai, tiek jo pašalinimo iš pastatų galimybės ir būdai. Pavyzdžiui, tai, kad dažniausiai pagrindinis radono šaltinis yra gruntas, nulemia didelius regioninius radono tūrinių aktyvumų patalpose skirtumus. Kai kuriais atvejais pagrindinis radono šaltinis gali būti statybinės medžiagos. Tokiais atvejais radono tūriniai aktyvumai patalpose gali būti ypač dideli.

Žmogaus apšvitos šaltinis yra ir radonas lauke. (UNSCEAR, 2000) duomenimis, nuo šio šaltinio pasaulyje kasmet vidutiniškai gaunama 0,095 mSv metinė efektinė dozė.

Nedidelė yra apšvitos nuo urano ir torio grandinių radionuklidų maiste ir geriamajame vandenyje jonizuojančiosios spinduliuotės dozė. Pasaulinis pagal žmonių amžių svertinis apšvitos nuo radionuklidų maiste jonizuojančiosios spinduliuotės kaupiamosios efektinės dozės vidurkis yra 140 μ Sv per metus (UNSCEAR, 2000).

Grunte ir statybinėse medžiagose esančių gamtinės kilmės radionuklidų gama spinduliuotė yra vienas svarbiausių išorinės apšvitos šaltinių. Kita svarbi šio šaltinio skiriamoji ypatybė yra tai, kad jis netolygiai pasiskirstęs, t. y., apšvita nuo jo skirtingose vietose yra labai skirtinga. Svarbu ir tai, jog atsiranda vis daugiau ir daugiau galimybių ir vis didesnis poreikis šį apšvitos šaltinį kontroliuoti.

Pagrindiniai faktoriai, lemiantys žmogaus apšvitą, yra gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai grunte ir statybinėse medžiagose, ir laikas, kurį žmogus praleidžia lauke ir patalpose, veikiamas šios apšvitos. Svarbu ir tai, jog pastatų statybinės medžiagos sugeria dalį grunte esančių radionuklidų spinduliuotės, bet pastatų viduje esančius žmones veikia statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė. Todėl statybinės medžiagos yra ir jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinis, ir apsauga nuo išorės jonizuojančiosios spinduliuotės.

Skirtinguose šaltiniuose pateikiamos skirtingos ekranavimo koeficientų (dozės galios reikšmių už ekrano ir prieš jį) reikšmės. (Leung, 1998) nurodoma, kad šis koeficientas pirmajame – trečiajame aukštuose lygus 0,66, ketvirtajame aukšte ir aukščiau – 0,80. (UNSCEAR, 2000) pateikiamos tipinės ekranavimo koeficiento reikšmės visoms patalpoms – 0,80.

Detalesnė informacija pateikiama (Julius, 1985). Ten nurodoma, kad medinių namų su medinėmis lubomis ekranavimo koeficientas lygus 0,82, patalpų su betoninėmis grindimis ir

lubomis – 0,50, patalpų daugiabučiuose namuose – 0,42. Šios ekranavimo koeficiento reikšmės ir buvo naudojamos šiame darbe įvertinant kosminės spinduliuotės įtaką sugertosios dozės galiai patalpose, kadangi jos yra iš įvairių medžiagų pastatytiems pastatams, be to, atskirai pateikiamos individualių ir daugiabučių namų ekranavimo koeficientų reikšmės.

Dalį išorinės apšvitos lauke sukelia radionuklidų, esančių grunte, jonizuojančioji spinduliuotė. Būdingi gamtinės kilmės radionuklidų savitųjų aktyvumų lygiai priklauso nuo uolienų tipų, iš kurių gruntai susidarė (Shirav-Schwartz, 2004). Didesni radionuklidų kiekiai yra vulkaninės kilmės uolienose, mažesni – nuosėdinėse. Tačiau yra išimčių. Kai kuriuose skalūnuose ir fosfatuose radionuklidų savitieji aktyvumai gali būti dideli. Daugelyje šalių atliekami tyrimai, kuriais siekiama nustatyti gamtinės kilmės radionuklidų grunte savitųjų aktyvumų lygius ir išanalizuoti, kokią įtaką šie aktyvumai turi ore sugertosios dozės galiai. Tokie darbai atliekami ir mūsų šalyje (Lebedytė, 1999).

Urano ir torio grandinių radionuklidai grunte ir statybinėse medžiagose ne visada yra radioaktyviojoje pusiausvyroje – būsenoje, kai visų arba dalies radioaktyviosios grandinės narių aktyvumai yra vienodi. Dėl nevienodų fizinių ir geocheminių savybių šie radionuklidai gamtinėje aplinkoje migruoja skirtingais greičiais ir skirtingais keliais, todėl ^{238}U ir ^{234}U izotopai yra tik apytikslėje radioaktyviojoje pusiausvyroje, nes tarp jų skilimo grandinėje yra daug trumpiau gyvuojantys ^{234}Th ir ^{234}Pa radionuklidai. Šie radionuklidai yra mobilesni negu ^{238}U , aplinkoje jie pernešami lengviau, todėl gali nutolti nuo savo šaltinio, t.y. ^{238}U . ^{234}U gali būti mažiau palyginti su ^{238}U grunte, o daugiau upėse ir jūrose.

^{226}Ra savitieji aktyvumai gali būti mažesni negu ^{238}U , nes radžio mobilumas aplinkoje yra didesnis negu urano. ^{226}Ra skilimo produktas yra dujinis elementas radonas ^{222}Rn , kuris išsiskiria iš grunto, taigi, pasižymi dar didesniu mobilumu, todėl jo skilimo produktų grunte yra mažiau negu ^{226}Ra . Panašūs procesai vyksta ir tarp ^{232}Th grandinės narių.

Nors radionuklido mobilumą aplinkoje sąlygoja jo geocheminės savybės, atstumas, kurį radionuklidas „nueis“ aplinkoje kol suskils, priklauso nuo jo pusėjimo trukmės. Pavyzdžiui, ^{228}Ra pusėjimo trukmė gana ilga, todėl jis gali atsiskirti nuo pirminio radionuklido ^{232}Th . Dujinis šios grandinės radionuklidas ^{220}Rn turi labai trumpą pusėjimo trukmę, todėl retai išsiskiria iš medžiagos, kurioje, skylant ^{228}Ra , atsirado.

Tam, kad apskaičiuoti išorinės apšvitos nuo grunte esančių radionuklidų gama spinduliuotės dozės galia, yra įvertinama dozės galia, tenkanti radionuklidų grunte savitojo aktyvumo vienetui (dozės koeficientas). Šį skaičiavimą palengvina dvi prielaidos – tai, kad šie radionuklidai grunte pagal gylį pasiskirstę tolygiai (grunto sluoksnyje, iš kurio paviršių pasiekia gama spinduliuotė), ir tai, kad grunto paviršius yra plokščias. Trijų skirtingų skaičiavimų metodų rezultatai pateikti 1.1 lentelėje. Neapibrėžtis sąlygoja grunto sudėties skirtumai.

1.1 lentelė. Efektinės dozės koeficientai suaugusiems žmonėms lauke (UNSCEAR, 2000)

Radionuklidas	Efektinės dozės koeficientai, (nSv·h ⁻¹)/(Bq·kg ⁻¹)		
⁴⁰ K	0,029	0,03	0,033
²³² Th grandinė	0,46	0,42	0,51
²³⁸ U grandinė	0,30	0,31	0,35

Patalpose būnančių žmonių apšvitos vertinimas yra sudėtingesnis.

Mediniai namai yra nežymus apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinis, tačiau jie ne itin gerai apsaugo nuo jonizuojančiosios spinduliuotės iš lauko. Todėl ore sugertosios dozės galia namo viduje gali būti tik nežymiai mažesnė negu dozės galia lauke.

Plytiniai, betoniniai, akmeniniai ir iš kitų mineralinių statybinių medžiagų pastatyti namai nuo gama spinduliuotės iš lauko apsaugo geriau, nes didesnį elektronų skaičių turio vienetui turinčios sienos geriau sugeria skvarbiąją spinduliuotę. Tokiais atvejais sugertosios dozės galia viduje daugiau priklauso nuo radionuklidų statybinėse medžiagose savitųjų aktyvumų. Todėl sugertosios dozės galia viduje dažniausiai yra didesnė – net jeigu gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose yra tokie pat kaip grunte. To priežastis – skiriasi šaltinio geometrija – pastatuose žmogų statybinės medžiagos supa iš visų pusių.

Todėl apšvita nuo jonizuojančiosios spinduliuotės patalpose daugiausia priklauso nuo medžiagų, iš kurių pastatas pastatytas. Ši apšvita yra didesnė ten, kur naudojamos mineralinės kilmės statybinės medžiagos.

Ore sugertosios dozės galia patalpose yra ištirta mažiau negu lauke. (UNSCEAR, 2000) pateikti duomenys apima tik 45 % pasaulio gyventojų. Jiems svertinis sugertosios dozės galios pastatuose vidurkis yra 84 nGy·h⁻¹, o atskirų šalių vidurkiai yra plačiose ribose – nuo 20 iki 200 nGy·h⁻¹. Mažesnės sugertosios dozės galios reikšmės patalpose yra kai kuriose šalyse, pavyzdžiui, Naujojoje Zelandijoje ir Islandijoje, kur vyrauja mediniai namai. Vengrijoje, Švedijoje, Italijoje, Ispanijoje šie dydžiai yra didesni, nes ten statybinėms medžiagoms gaminti dažniau naudojamos mineralinės žaliavos.

Sugertųjų dozių viduje ir lauke santykis ne tik atspindi gamtinės apšvitos sąlygas specifinėse vietovėse, bet ir duoda bendresnį supratimą apie padėtį įvairiose šalyse. Įvairių šalių dozės galios viduje ir lauke santykiai yra nuo 0,6 iki 2,3, pasaulinis svertinis vidurkis – 1,4. Skirtingi yra ir atskirų šalių pateikti gyventojų pasiskirstymai pagal sugertosios dozės galia patalpose. Belgijos, Danijos ir Rumunijos pateikti pasiskirstymai yra apytikriai simetriški, Bulgarijos pasiskirstymas palyginti siauras, Vengrijos – platus, Italijos - platus ir turi du maksimumus. Rusijos, Suomijos ir Lietuvos (Radiacinės saugos centro duomenys) pateiktuose

pasiskirstymuose aukščiau šalies vidurkio yra atskiri maksimumai. Šie skirtingi pasiskirstymai paaiškinami įvairiais pastatų tipais, kuriuose gyvena gyventojai (UNSCEAR, 2000).

Kol nėra priimto vieningo apšvitos tyrimų protokolo, galimos tam tikros sisteminės neapibrėžtys. Pavyzdžiui, matavimai lauke turi būti atliekami atviroje vietovėje, bet kartais jie atliekami gatvėse, netoli pastatų, kuriuose esančių radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė turi įtakos rezultatams.

Tam, kad įvertinti metinę efektinę dozę pagal sugertosios dozės ore matavimus, būtina žinoti žmonių buvimo patalpoje (patalpų užimtumo) ir sugertosios bei efektinės dozių ryšio koeficientus. Pastarasis koeficientas priklauso nuo spinduliuotės energijos, o tiksliau – nuo energinio spektro. Užimtumo koeficientas parodo, kokią dalį laiko žmogus praleidžia patalpose.

(UNSCEAR, 1993) rekomenduoja naudoti sugertosios ir efektinės dozių ryšio koeficientą $0,7 \text{ Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$, užimtumo koeficientą – 0,8. Tokiu atveju pasaulyje metinė efektinė apšvitos nuo išorinės spinduliuotės dozė yra 0,48 mSv. Atskirose šalyse ji yra nuo 0,3 iki 0,6 mSv. Metinės efektinės kūdikių ir vaikų apšvitos nuo išorinės spinduliuotės patalpose dozės yra, atitinkamai, apie 10 % ir 30 % didesnės negu suaugusių žmonių dėl didesnių sugertosios ir efektinės dozių ryšio koeficientų, kurie priklauso nuo žmogaus jautrio jonizuojančiajai spinduliuotei, o šis jautris priklauso nuo žmogaus amžiaus.

Minėtos sugertosios ir efektinės dozių ryšio koeficiento ir užimtumo koeficiento reikšmės naudotos ir šiame darbe.

1.2. Gamtinės ir dirbtinės kilmės radionuklidai statybinėse medžiagose

1.2.1. Gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose

Vienas svarbiausių parametru, lemiančių žmonių apšvitą nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės, yra gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai. Jie priklauso nuo žaliavų, naudojamų gaminant statybines medžiagas, ir jų gamybos technologijos. Gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai gali būti įvairūs netgi to paties tipo žaliavose. Statybinėms medžiagoms gaminti naudojamos ir įvairios technologijos. Dėl šių priežasčių gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai gali žymiai skirtis netgi tokiose pačiose statybinėse medžiagose. Todėl siekiant nustatyti šiuos aktyvumus, turi būti atliekami gamtinės kilmės radionuklidų savitųjų aktyvumų matavimai įvairiose statybinėse medžiagose ir analizuojami šių aktyvumų pasiskirstymai įvairiuose tos pačios rūšies statybinių medžiagų bandiniuose.

Brazilijoje, Rio Grande de Norte provincijoje buvo paimti 35 statybinių medžiagų ir jų žaliavų bandiniai. Gamtinės kilmės radionuklidų savitųjų aktyvumų matavimai atlikti

puslaidininkiniu Ge spektrometru. ^{226}Ra savitieji aktyvumai tirtuose statybinių medžiagų bandiniuose buvo nuo $18,1 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (gipse) iki $806,7 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (granite) (Malanca, 1993). Šie tyrimai rodo, kad gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai įvairiose medžiagose gali būti labai įvairūs.

Gama spektrometriškai buvo tiriami gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai grunto ir statybinių medžiagų bandiniuose iš įvairių Jordanijos regionų. Nustatyti ^{232}Th , ^{226}Ra ir ^{40}K savitieji aktyvumai. Gauti rezultatai palyginti su kitose šalyse gautais rezultatais. Apskaičiuotos radžio lygiaverčių aktyvumų reikšmės. Kelių marmuro bandinių radžio lygiaverčio aktyvumo reikšmės viršijo ribines, nustatytas OECD (*angl. k. Organization for Economic Co-operation and Development*) ($370 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$). Tačiau dauguma tirtų statybinių medžiagų atitiko OECD reikalavimus statybinėms medžiagoms (Ahmad, 1998).

Radžio lygiavertis aktyvumas (*angl. radium equivalent*) yra dydis, kuriuo įvertinamas visų gamtinės kilmės radionuklidų įtaka galimai apšvitai. Radžio lygiavertis aktyvumas apskaičiuojamas ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K savituosius aktyvumus dalinant iš tam tikrų skaičių. Šie skaičiai priklauso nuo atitinkamo radionuklido ir jo skilimo grandinės narių įtakos apšvitos dozėms. Taip gaunamas aktyvumas, kuris lygus ^{226}Ra aktyvumui, turinčiam tokią pat įtaką apšvitos dozėms, kaip visi tiriamoje medžiagoje esantys gamtinės kilmės radionuklidai. Šis parametras naudojamas radiacinės saugos požiūriu įvertinti statybines medžiagas, nors kartais jis taikomas ir grunto tyrimų rezultatams (Singh, S.; Rani, A.; 2005).

Radžio lygiavertis aktyvumas pagal savo apibrėžimą yra dydis, panašus į šiame darbe naudojamą ir toliau apibrėžtą aktyvumo rodiklį. Šie abu dydžiai skiriasi tik tuo, kad metinė efektinė apšvitos nuo statybinėse medžiagose, kurių radžio lygiavertis aktyvumas yra $370 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozė bus $1,5 \text{ mSv}$. Tuo tarpu apšvitos, naudojant statybines medžiagas, kurių aktyvumo rodiklis lygus 1, metinė efektinė dozė bus 1 mSv . Šiuo metu vertinant statybines medžiagas radiacinės saugos požiūriu vietoje radžio lygiaverčio aktyvumo vis dažniau naudojamas aktyvumo rodiklis.

^{232}Th , ^{226}Ra ir ^{40}K savitieji aktyvumai buvo išmatuoti septynių skirtingų statybinių medžiagų 47 bandiniuose Kanadoje. Šie aktyvumai buvo maži medienoje ir natūraliame gipse. Plytose ir plytelėse ^{226}Ra buvo iki $121 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, ^{232}Th – iki $160 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ir ^{40}K – iki $990 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Metinė efektinė apšvitos nuo šiose medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozė buvo nuo $0,01$ iki $0,14 \text{ mSv}$ (Zikovsky, 1992).

Gama spektrometriškai buvo išmatuoti gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai Honkonge dažnai naudojamose statybinėse medžiagose, anglies pelenuose ir šlake bei statybiniuose gaminiuose. Iš Kinijos importuotuose cementuose ir smėlyje radionuklidų savitieji aktyvumai buvo mažiausi. Vietiniame cemento šių radionuklidų aktyvumai buvo daug didesni,

kadangi jo gamybai naudojamas didelius šių radionuklidų kiekius turintis granitas. Radionuklidų aktyvumai anglies pelenuose ir šlake buvo maždaug tokie pat kaip ir kitose šalyse. Daroma išvada, kad statybinių medžiagų gamybai naudojant pelenus ir šlaką, radionuklidų savitieji aktyvumai žymiai nepadidėja (Man, 1989).

Buvo nustatyti ^{226}Ra , ^{228}Ra ir ^{40}K savitieji aktyvumai ir ^{222}Rn ekshalacijos iš kai kurių JAV statybinių medžiagų greičiai. Panašūs savitieji aktyvumai rasti mineralinėje vatoje, pagamintoje iš Tenesio fosfatų šlako, ir iš aukštakrosnių šlako pagamintoje izoliacijoje. Betono blokuose, pagamintuose iš fosfatų šlako, nustatyti padidinti ^{226}Ra ir ^{228}Ra savitieji aktyvumai lyginant su įprastiniais betono blokais (Paredes, 1987).

Nustatyta, kad kai kuriose statybinėse medžiagose JAV yra dideli ^{226}Ra savitieji aktyvumai. Tokios medžiagos buvo betonas, cemento blokai, gipso plokštės ir plytos. Didžiausias ^{226}Ra savitasis aktyvumas užfiksuotas betone, pagamintame iš granito ir skalūnų (NCRP Nr. 103, 1989).

Indijoje gama spektrometriškai išmatuoti ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose ir nustatyta, kad jie atitinkamai yra $(3,2 - 151,7) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, $(14 - 63,7) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ir $(24,3 - 121,5) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. ^{238}U savitieji aktyvumai, nustatyti naudojant branduolinių trekų metodiką, buvo lygūs $(0,11 - 3,5) \text{ ppm U}$ (nors urano izotopai radioaktyvūs, urano koncentracija grunte ir kituose aplinkos objektuose dažnai matuojama jo atomų skaičiumi, tenkančiu milijonui aplinkos atomų, ppm – angl.k. *parts per million*). Šie rezultatai buvo palyginti su kitose šalyse gautais rezultatais. Siekiant įvertinti galimą apšvitą naudojant šias medžiagas namų statybai, buvo apskaičiuotas ir ištirtų bandinių radžio lygiavertis aktyvumas. Visų statybinių medžiagų radžio lygiavertis aktyvumas buvo mažesnis už leidžiamą OECD, t.y. $370 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Nustatyta, kad yra koreliacija tarp ^{238}U ir ^{226}Ra savitųjų aktyvumų šiose medžiagose (Kumar, 2003).

Didelės skiriamosios gebos gama spektrometrine sistema buvo tiriami natūralių ir pagamintų statybinių medžiagų bandiniai. ^{226}Ra , ^{232}Th , ir ^{40}K savitieji aktyvumai surinktų statybinių medžiagų bandiniuose atitinkamai buvo $(12 - 65) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, $(7 - 51) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ir $(36 - 675) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Amrani, 2001). (Ahmed, 2005) pateikiami duomenys apie tai, kad tirtame marmure ^{226}Ra ir ^{40}K savitieji aktyvumai buvo $(205\pm 83) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ir $(870\pm 390) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, granite $^{232}\text{Th} - (118\pm 14) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Tanzanijoje atliekant ^{226}Ra savitųjų aktyvumų tyrimus statybinėse medžiagose, pagamintose iš gipso, nustatyta, kad šio radionuklido ten yra $5 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Msaki, 2000). Tuo tarpu kreidos milteliuose šio radionuklido buvo $24,25 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Japonijoje ištyrus gamtinės kilmės radionuklidų savituosius aktyvumus gelžbetonio sudedamosiose dalyse – pliene, užpilduose, cemente, cemento prieduose ir vandenyje, nustatyta,

kad ^{40}K , ^{238}U ir ^{232}Th savitieji aktyvumai gelžbetonyje atitinkamai yra (6,8 – 912,5 (vidurkis 505,2)) $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, (2,93 – 86,7 (vidurkis 32,3)) $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ir (1,59 – 61,6 (vidurkis 25,6)) $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Suzuki, 2000).

Kinijoje, kai kuriuose Šanchajaus regionuose ištyrus gamtinės kilmės radionuklidų savituosius aktyvumus cemente ir iš jo pagamintose statybinėse medžiagose, nustatyta, kad ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K vidutiniai savitieji aktyvumai plytose atitinkamai yra 46,2, 28,4 ir 137,4 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, o tinke – 64,7, 48,7 ir 161,3 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Xinwei, 2005, Health Physics). Panašūs rezultatai gauti išanalizavus aštuonių skirtingų statybinių medžiagų bandinius, kuriuose ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K savitieji aktyvumai buvo (19,5 – 68,3), (13,4 – 63,2) ir (63,2 – 713, 9) $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Xinwei, 2005, Radiation measurements).

Rusijoje, Briansko regione buvo ištirti statybinių medžiagų gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai ir statybinių medžiagų, pagamintų naudojant pramonines atliekas, radionuklidų savitieji aktyvumai. Pusiaidininkine gama spektrometrine sistema buvo matuojami aktyvumai ir radono emanacijos iš statybinių medžiagų koeficientai. Nustatyta, kad šios vietinės statybinės medžiagos atitinka pirmosios klasės reikalavimus, t.y. gali būti naudojamos be apribojimų namams statyti. (Lukutsova, 2001).

Molyje yra gana dideli gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai. Tai yra susiję su tuo, kad gamtinės kilmės radionuklidai yra absorbuojami molio dalelių. (Dodona, 2000) darbe nagrinėjami gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai įvairiose rūšyse Albanijos molio, naudojamo kaip žaliava statybinių medžiagų pramonėje (plytų, keramikos, cemento, užpildų, glaistų ir kt. gamybai). Jos buvo ištirtos geologiniu ir mineraloginiu aspektais. Ištirtos ir jų fizikinės–mechaninės savybės. Ištirti gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai jose. Radiacinės saugos požiūriu gamtinė apšvita nuo Albanijos molio neviršija nustatytų lygių ir gali būti naudojami pastatų statybai.

Kita statybinių medžiagų žaliava, kurioje gali būti dideli gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai, yra granitas.

Kipre nustatyti savitieji aktyvumai įvairių rūšių granite buvo: ^{232}Th – (1 – 906) $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, ^{238}U – (1 – 588) $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ir ^{40}K – (50 – 1606) $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Tzortzis, 2003). Dideli gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai rasti ir Brazilijoje išgaunamo granito bandiniuose (Anjos, 2005).

Gama spektrometriškai ištyrus 160 gamtinės kilmės ir pagamintų statybinių medžiagų Egipte, nustatyta, kad granite gamtinės kilmės radionuklidų aktyvumai buvo didesni, tuo tarpu, kitose medžiagose – molyje, raudonose plytose, smėlyje, cemente, keramikoje, marmure ir gipse – buvo tik gamtinės kilmės radionuklidų pėdsakai (El-Arabi, 2001).

Galima granito įtaka padidintai žmonių apšvitai nurodoma ir (Papastefanou, 2004). Ši apšvita gali būti nuo apdailai naudojamose granitinėse plytelėse esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės. Kitas padidintos apšvitos šaltinis Graikijoje, šio darbo duomenimis, gali būti konstrukcijos, kuriose yra iki 20 % lengvųjų pelenų – jose ^{226}Ra savitieji aktyvumai būna iki $1000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Didelę reikšmę turi pramonės atliekos, kurios naudojamos statybinėms medžiagoms gaminti. Kartais tose atliekose būna dideli gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai. Viena tokių atliekų rūšis – gipsas ir fosfogipsas, atsirandantis fosfatų pramonėje. Apdorojant kalcio fosfatą, į gamybos atliekas – fosfogipsą – patenka daug ^{226}Ra . Šio radionuklido pasiskirstymas priklauso nuo gamybos proceso technologijos (NCRP Nr. 103, 1989), (IAEA Nr.419, 2003).

Dideli radžio savitieji aktyvumai palyginus su kitomis statybinėmis medžiagomis gali būti ir fosfogipso plokštėse (Jang, 2003). Fosfogipso plokštės, kuriose ^{226}Ra savitieji aktyvumai yra $(180 - 550) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, gaminamos ir plačiai naudojamos kaip statybinė medžiaga Korėjoje (Jang, 2002).

Rezultatai, gauti matuojant gamtinės kilmės radionuklidų savituosius aktyvumus Lenkijoje naudojamose statybinėse medžiagose ir jų žaliavose, pateikti (Zalewski, 2001). Nustatyta, kad plytose ^{226}Ra gali būti $(22 - 71) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, ^{232}Th $(26 - 68) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, ^{40}K $(411 - 1205) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, žaliavose ^{226}Ra gali būti $(4 - 154) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, ^{232}Th $(22 - 91) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, ^{40}K $(1261 - 1032) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

(Khan, K.; Khan, H. M., 2001) darbe pateikiami rezultatai, gauti tiriant gamtinės kilmės radionuklidų savituosius aktyvumus portlandcementyje, gaminamame Pakistano šiaurės vakarų pasienio provincijoje. Įvairios žaliavos – sudėtinės portlandcemenčio dalys – buvo tirtos gama spektrometriškai. Suminis specifinis aktyvumas visų trijų gamtinių radionuklidų (^{40}K , ^{226}Ra ir ^{232}Th) buvo šiose ribose (didžiausios ir mažiausios reikšmės): $(188\pm64) - (573\pm73) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (portlandcemente), $(55\pm16) - (184\pm31) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (klintyse); $(87\pm31) - (297\pm64) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (gipse); $(696\pm79) - (1044\pm85) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (skalūne), ir $(491\pm55) - (570\pm60) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (latrite). ^{40}K savitieji aktyvumai portlandcemente ir visose žaliavose buvo didesni, palyginus su ^{226}Ra ir ^{232}Th savitaisiais aktyvumais. Daroma išvada, kad visas šias medžiagas radiacinės saugos požiūriu galima naudoti be apribojimų.

(El-Bahi, 2004) darbe pateikiami duomenys, gauti tiriant gamtinės kilmės radionuklidų savituosius aktyvumus 65 cemento bandiniuose iš skirtingų gamyklų Egipte. ^{226}Ra savitieji aktyvumai buvo $(21,66 - 46,22) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, ^{232}Th $(10,37 - 27,87) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, ^{40}K $(50,94 - 147,37) \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Atliekant gamtinės kilmės radionuklidų savitųjų aktyvumų tyrimus įvairiose Nigerijoje naudojamo betono rūšyse, nustatyta, kad ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K juose yra, atitinkamai, (47 ± 21) , (52 ± 21) ir (352 ± 222) Bq·kg⁻¹ (Farai, 2001).

^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K savitieji aktyvumai Korėjoje naudojamose statybinėse medžiagose (Lee, 2001) darbo duomenimis atitinkamai yra $(6,47 - 271)$ Bq·kg⁻¹, (mažiau minimalaus detektuojamo lygio – 89,9 Bq·kg⁻¹) ir $(16,8 - 1081)$ Bq·kg⁻¹.

Radiacinės saugos požiūriu buvo įvertintos Airijos statybinės medžiagos (Lee, 2004). Gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai išmatuoti 70 įvairių statybinių medžiagų bandinių. Šios statybinės medžiagos buvo: užpildai, smėlis, akmenys, plytos, cementas, betonas, gipso kartono plokštės, izoliacinės medžiagos, grindų ir sienų plytelės ir mediena. Matavimai atlikti Ge spektrometru. Didžiausi ^{226}Ra savitieji aktyvumai užregistruoti (mažėjimo tvarka) plytelėse, cemento ir plytose, didžiausi ^{232}Th ir ^{40}K savitieji aktyvumai – plytose, plytelėse ir akmenyse. Visai atvejais mažiausi ^{226}Ra aktyvumai užregistruoti (didėjimo tvarka) medienoje, smėlyje ir gipse, ^{232}Th – medienoje, gipse ir smėlyje, ^{40}K – medienoje, gipse ir izoliacinėse medžiagose. Bendras gamtinės kilmės radionuklidų aktyvumas įvertintas naudojantis aktyvumo rodikliu (Radiation Protection 112, 1999):

$$I = \frac{C_{Ra}}{300} + \frac{C_{Th}}{200} + \frac{C_K}{3000}, \quad (1.1)$$

čia C_{Ra} , C_{Th} , ir C_K – savitieji ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K aktyvumai, Bq·kg⁻¹.

Šis aktyvumo rodiklis 1 viršijo tik vienam bandinyje – skaldoje. Aktyvumo rodiklis 0,5 viršijo 56 plytelių, plytų ir užpildų bandiniuose. Daroma išvada, jog jeigu statybinės medžiagos pastate yra daug (pavyzdžiui, betono) ir jos radionuklidų aktyvumo rodiklis viršija 0,5, metinė efektinė dozė gali būti apie 0,3 mSv. Tikimybė, kad ši dozė bus 1 mSv, labai maža.

Didelę reikšmę radionuklidų savitiesiems aktyvumams statybinėse medžiagose gali turėti ne tik jų žaliavos, bet ir radionuklidų cheminės bei fizinės savybės. (Haridasan, 2002) darbe pateikiama informacija apie ^{226}Ra , esančio fosfogipse, tirpumą. Tirtas tirpumas distiliuotame ir lietaus vandenyje esant skirtingoms sąlygoms – tirpinimo laikui, santykiui tarp skysčio ir kietos medžiagos kiekių bei esant sąlygoms, kuo artimesnėms natūralioms. ^{226}Ra savitasis aktyvumas tirpale buvo nuo 0,07 iki 0,53 Bq·l⁻¹. Rezultatai rodo, kad lauko sąlygomis ^{226}Ra , esantis fosfogipse, gali būti tirpinamas lėtai.

Kaip minėta, apšvita nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės priklauso ir nuo to, kiek tų medžiagų yra naudojama pastate. Nors nedideli statybinių medžiagų kiekiai pastate paprastai nėra žymus apšvitos šaltinis, būna ir išimčių. (Busto, 2002) darbe aprašomi matavimai, kuriais buvo nustatoma, kokie gamtinės kilmės

radionuklidų savitieji aktyvumai yra klijuose, kurie buvo naudojami neutrinų registravimo laboratorijos statyboje. Šie tyrimai buvo atliekami siekiant surasti tokias statybines medžiagas, kuriose esančių radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė sukeltų kuo mažesnę apšvitą. Nors ši apšvita radiacinės saugos požiūriu nėra svarbi, ji gali turėti didelę įtaką ten, kur matavimams reikia kuo mažesnės dozės galios aplinkoje. Todėl radionuklidų statybinėse medžiagose problema įgyja ir kitą aspektą – gali būti svarbu nustatyti, kokios apšvitos nuo šiose medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės bus ir tada, kai šios dozės radiacinės saugos požiūriu ir nėra didelės.

Apibendrinti duomenys apie radionuklidų savituosius aktyvumus įvairiose statybinėse medžiagose pateikiami (IAEA Nr. 419, 2003) (1.2 lentelė).

1.2 lentelė. Radionuklidų savitieji aktyvumai įvairių tipų statybinėse medžiagose (IAEA Nr. 419, 2003)

Medžiaga	Savitieji aktyvumai, Bq·kg ⁻¹		
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Betonas	1 – 250	1 – 190	5 – 1570
Aeruotas ir lengvasis betonas	9 – 2200	<1 – 220	180 – 1600
Molio (raudonos) plytos	1 – 200	1 – 200	60 – 2000
Smėlio – kalkių plytos ir kalkakmenis	6 – 50	1 – 30	5 – 700
Natūralūs statybiniai akmenys	1 – 500	1 – 310	1 – 4000
Natūralus gipsas	<1 – 70	<1 – 100	7 – 280
Cementas	7 – 180	7 – 240	24 – 850
Plytelės (glazūruotos ir neglazūruotos)	30 – 200	20 – 200	160 – 1410
Fosfogipsas (sausasis tinkas)	4 – 700	1 – 53	25 – 120
Aukštakrosnių šlakas ir cementas	30 – 120	30 – 220	–

(IAEA Nr. 419, 2003) darbe perspėjama, kad šie duomenys gali būti ne visiškai reprezentatyvūs. Pirma, visų statybinių medžiagų tyrimai atlikti tik keliose šalyse, antra, literatūroje dažniausiai pateikiami duomenys, gauti atliekant statybinių medžiagų, kuriose gamtinės kilmės radionuklidų yra daugiau negu vidutiniškai, tyrimus.

Visi šie duomenys rodo, kokiose plačiose ribose gali būti gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose. Iš turimų duomenų galima daryti išvadą, kad didesni aktyvumai gali būti statybinėse medžiagose iš molio, granito, fosfogipso, mažesni – iš gipso, medžio. Tačiau iš to, kokios žaliavos buvo naudojamos statybinėms medžiagoms gaminti, daryti vienareikšmiškos išvados apie radionuklidų savituosius aktyvumus jose negalima. Informaciją, kurios reikia įvertinant apšvitą nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės, galima gauti tik atliekant šių radionuklidų savitųjų aktyvumų matavimus.

Ypač sunku numatyti radionuklidų aktyvumus statybinėse medžiagose, kurių gamybai naudojamos „netradicinės“ žaliavos, pavyzdžiui, pramonės atliekos. Todėl daryti visiškai

patikimas prognozes apie tai, kokie gali būti radionuklidų savitieji aktyvumai vienose ar kitose statybinėse medžiagose, rizikinga.

Dėl didelių statybinių medžiagų kiekių ir plačios jų įvairovės matavimais patikrinti visų statybinių medžiagų neįmanoma. Išskyla optimalios statybinių medžiagų tyrimų apimties nustatymo problema.

Gamtinės kilmės radionuklidų savitųjų aktyvumų tyrimai turi būti atliekami ir tose statybinėse medžiagose, kuriose šie aktyvumai yra palyginti nedideli. Informacija apie aktyvumus tokiose medžiagose padeda įvertinti, kokią apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozę gauna žmonės. Turėtų būti atliekami detalesni medžiagų, kuriose galimi didesni gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai, tyrimai. Taip galima identifikuoti „problemines“ radiacinės saugos požiūriu statybines medžiagas.

Matavimų strategijai suformuoti būtina žinoti, kokiose statybinėse medžiagose gali būti didesni gamtinės kilmės radionuklidų aktyvumai. Tam gali padėti statybinių medžiagų klasifikacija radiacinės saugos požiūriu, kuri buvo atlikta šiame darbe. Vienas kriterijų, kuriuo buvo naudojamos statybines medžiagas klasifikuojant radiacinės saugos požiūriu, buvo galimi gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai jose.

1.2.2. Radono išsiskyrimas iš statybinių medžiagų

Analizuojant statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės įtaką žmonių apšvitai, svarbu atsižvelgti ne tik į radionuklidų, esančių statybinėse medžiagose, gama spinduliuotę, bet ir į spinduliuotę, kurią skleidžia radonas ir jo skilimo produktai.

Radonas – radono izotopas ^{222}Rn – atsiranda skylant ^{226}Ra . Dėl ilgos palyginti su kitais radono izotopais pusėjimo trukmės (3,8 paros) ir judrumo (radonas yra inertinės dujos) šis radionuklidas gali išsiskirti iš medžiagų, kuriose jis susidaro (pvz. statybinių medžiagų) ir kauptis uždaroje patalpose, kur jo turinys aktyvumas gali pasiekti šimtus, tūkstančius ir dešimtis tūkstančių bekerelių kubiniam metrui. Radono skilimo produktai pasižymi dideliais dozės koeficientais, todėl apšvitos nuo jų dozės gali būti didelės. Dažnai radonas patalpose yra pagrindinis žmogaus apšvitos šaltinis.

Yra ir kitas radiacinės saugos požiūriu svarbus radono izotopas – ^{220}Rn , tačiau dažniausiai jo įtaka yra nedidelė, palyginus su ^{222}Rn . Dideli ^{220}Rn turiniai aktyvumai gali būti tik pastatuose, pastatytuose iš daug ^{232}Th (jam skylant ir susidaro ^{220}Rn) turinčių statybinių medžiagų arba pastatuose be grindų, pastatytuose ant daug ^{232}Th turinčio grunto (Masahiro, 1997), (Yu, 1997).

Šiame darbe analizuojama ^{222}Rn įtaka apšvitai. Visur toliau šis radono izotopas bus vadinamas radonu.

Nustatyta, kad dažniausiai pagrindinis radono šaltinis pastatuose yra gruntas (UNSCEAR, 2000). Ta pati išvada gauta atliekant radono tūrinių aktyvumų tyrimus Lietuvoje, individualiuosiuose namuose (Mastauskas, 1996), (Morkūnas, 1997), (Morkūnas, 2000). Tačiau gruntas pagrindinis radono šaltinis yra ne visada.

Radonas į patalpas patenka trim būdais: konvekcija iš grunto per plyšius ir angas, difuzija iš grunto per statybinių medžiagų poras ir ekshaliacija iš statybinių medžiagų (Kovler, 2004).

Pirmasis būdas yra svarbiausias. Antrojo būdo svarba padidėja tada, kai radono tūrinis aktyvumas grunte yra didelis ir inžinerinio barjero tarp grunto ir namo vidaus storis yra mažesnis už radono difuzijos kelio ilgį, arba apytikriai lygus jam.

Trečiasis būdas yra svarbus tada, kai pirmųjų dviejų būdų įtaka nėra didelė (pavyzdžiui, patalpose, esančiose aukštai virš grunto) bei tada, kai radono ekshaliacijos greitis iš statybinių medžiagų yra didelis, o patalpų vėdinimo intensyvumas mažas. Kai kuriais atvejais hermetiškuose betoniniuose pastatuose radono gali išsiskirti iš betono tiek, kad jo tūrinis aktyvumas gali pasiekti $2000 - 3000 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (Sextro, 1994).

Pirmojo būdo svarba sumažėja, kai inžinerinis barjeras tarp grunto ir pastato yra geros kokybės ir visi plyšiai užsandarinti. Pagerinus inžinerinį barjerą, padidėja trečiojo būdo svarba. Šio būdo svarba sumažėja padidinus patalpų vėdinimo greitį iki vieno arba kelių oro pasikeitimų per valandą, tuo tarpu, vėdinimo greitis pirmojo ir ypač antrojo būdo svarbai dažnai neturi jokios reikšmės.

(Chauhan, 2002) darbe nustatyta, kad radonas difuzijos būdu gali praeiti pro storus porėtų statybinių medžiagų sluoksnius. Pagrindiniai mechanizmai, kuriais radonas patenka į patalpas, yra advekcijs ir difuzija. Advekcijs priklauso nuo slėgių skirtumo arba radono tūrinio aktyvumo gradiento konstrukcijoje, kuria radonas migruoja. Radono patekimas į patalpas taip pat priklauso ir nuo statybinių konstrukcijų rūšies. Nustatyta, kad įtakos turi tai, kiek šios konstrukcijos yra sutankintos, kadangi sutankinimas turi įtakos medžiagų poringumui ir pralaidumui.

Medžiaga laikoma nepralaidžia radonui, jeigu jos storis yra 3 kartus didesnis už radono difuzijos kelio ilgį toje medžiagoje (Keller, 2001).

Skirtingai nuo individualiųjų arba sublokuotų namų, daugiaaukščiuose namuose statybinės medžiagos pagrindinis radono šaltinis gali būti kur kas dažniau. Taip atsitinka todėl, kad daug butų tokiuose namuose yra toli nuo grunto paviršiaus, todėl į šias patalpas iš grunto patenka palyginti nedaug radono. Tai rodo ir (Shaikh, 2003) darbe pateikti rezultatai. Vienerius metus buvo nuolat matuojamas ^{222}Rn tūrinis aktyvumas daugiaaukščiame name Bombėjuje,

Indijoje. Matuota naudojant alfa trekų detektorius. Nustatyta, kad didėjant aukštui, radono tūrinis aktyvumas mažėja – nuo $41 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ pirmame aukšte iki $15 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ – devynioliktoje.

(Clouvas, 2003) tyrimų rezultatai rodo, kad radono tūriniam aktyvumams aukštesniuose aukštuose didesnę įtaką turi statybinės medžiagos. Atliekant dozės galios ir radono tūrinių aktyvumų patalpose matavimus, nustatyta, kad pirmajame aukšte koreliacijos tarp šių dviejų parametrų nėra, tačiau jau antrajame aukšte pastebima silpna koreliacija. Tai galima paaiškinti tuo, kad yra ryšys tarp dozės galią apsprendžiančių radionuklidų, tarp jų ir ^{226}Ra , savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose ir radono tūrinių aktyvumų patalpose, o tai reiškia, kad kylant į viršų ^{226}Ra , esančio statybinėse medžiagose, įtaka radono tūriniam aktyvumams didėja.

Didelė statybinių medžiagų įtaka radono tūriniam aktyvumams daugiaaukščiuose namuose nustatyta ir (Yu, 1999) darbe. Tai, kad radono tūriniam aktyvumams turi įtakos ir statybinės medžiagos, nurodoma (Baeza, 2003) darbe.

Ši įtaka kai kuriais atvejais gali būti svarbi radiacinės saugos požiūriu, todėl ne viename darbe analizuojama statybinių medžiagų įtaka radono tūriniam aktyvumams patalpose.

Radono tūriniai aktyvumai patalpose priklauso nuo statybinių medžiagų – cemento, grunto, lengvųjų pelenų, smėlio, marmuro skaldos, plytų miltelių, kalkių ir jų sudedamųjų dalių pralaidumo radonui (Chauhan, 2001), (Kumar, 2005). (Jang, 2002) darbe įvertinamas ^{226}Ra , esančio fosfogipso plokštėse, naudojamose butams statyti, poveikis apšvitai.

Tačiau ^{226}Ra savitasis aktyvumas statybinėje medžiagoje ne visada yra radono ekshalaciją nulemiantis veiksnys (Kovler, 2005). Šiame darbe gauta, kad nors ^{226}Ra lengvuosiuose pelenuose yra apie 3 kartus daugiau negu cimente, radono iš cemento išsiskyre apie 15 kartų daugiau. (Al-Jarallah, 2005) darbe pateikiami duomenys apie tai, kad ^{226}Ra savitojo aktyvumo 205 statybinių medžiagų bandiniuose ir iš jų išsiskyrusio radono kiekio koreliacijos koeficientas buvo 0,90.

Visa tai rodo, koks yra sudėtingas statybinėse medžiagose susidariusio radono ekshalacijos mechanizmas.

Kadangi iš statybinių medžiagų išsiskyręs radonas pašalinamas natūralaus ar mechaninio vėdinimo sistemomis, radono ir jo skilimo produktų tūriniai aktyvumai ir pusiausvyra tarp jų priklauso nuo pastatų konstrukcijos ir aplinkos sąlygų. (Leung, 1998) darbe aprašomi tyrimai, atlikti įvairiais metų laikais ir didelėje teritorijoje, siekiant nustatyti, kaip kinta radono tūriniai aktyvumai, kaip šie aktyvumai priklauso nuo aplinkos, kaip kinta dozės galia patalpose ir kaip dozės galia susijusi su radono tūriniais aktyvumais bei kaip radono skilimo produktų tūriniai aktyvumai ir pusiausvyros koeficientas priklauso nuo aplinkos sąlygų daugiaaukščiuose pastatuose.

(Tso, 1994) darbe aprašomi rezultatai, gauti nustatant radono difuzijos statybinėse medžiagose koeficientus. Išanalizuota, kokią įtaką ^{222}Rn ekshaliacijai turi medžiaga, kuria padengtos statybinės konstrukcijos. Nustatyta, kad ši medžiaga ^{222}Rn ekshaliacijos greitį gali sumažinti (2 – 68) %. Radono ekshaliacijos greitis didėja didėjant temperatūrai iki 500°C. Šioje temperatūroje ekshaliacijos greitis greitį 200°C temperatūroje viršija 4 kartus.

Buvo tiriami radono ekshaliacijos iš betono, granito, raudonųjų plytų ir silikatinių plytų greičiai (Chao, 1999). Tyrimai atlikti specialioje hermetiškoje kameroje. Nustatyta, kad didelę įtaką turi radono difuzija į statybines medžiagas iš patalpų, kuriose yra dideli radono tūriniai aktyvumai. Radono ekshaliacijos greitį darbo autoriai apibūdina pradinio ekshaliacijos greičio ir difuzijos priešinga kryptimi koeficiento bei radono tūrinio aktyvumo patalpoje reikšmėmis. Kai kuriais atvejais radono ekshaliacijos greitis gali būti žymiai mažesnis negu pradinis ekshaliacijos greitis. Buvo sukurta duomenų bazė iš rezultatų, gautų tiriant 26 bandinius.

Didžiojoje Britanijoje 1988 metais surinkti duomenys apie radono tūrinius aktyvumus patalpose buvo panaudoti analizuojant, nuo kokių parametrų šie aktyvumai priklauso (Gunby, 1993). Tarp tokių parametrų kaip gruntas, ant kurio pastatytas namas, namo tipas, patalpų aukštis virš grunto, langų atidarinėjimo dažnis paminėtos ir statybinės medžiagos. Tačiau visi šie parametrai kartu lemia tik 22 % radono tūrinių aktyvumų. Pateikiamas kiekvieno faktoriaus įtakos kiekybinis įvertinimas.

(van Dijk, 1991) darbe aprašomi rezultatai, gauti tiriant dažnai naudojamas statybines medžiagas. Didėjant vandens garų slėgiui, radono ekshaliacijos iš gipso greitis didėja, o iš betono – mažėja. Radono ekshaliacijos greitis iš 20 Olandijoje naudojamų statybinių medžiagų, esant 50 % santykinei drėgmei ir 20°C temperatūrai, buvo nuo 0,02 iki 15,8 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Mažiausiu ekshaliacijos greičiu pasižymi natūralus gipsas, didžiausiu – fosfogipsas. Ekshaliacijos greičiai iš medžiagų, kuriose yra pelenų, panašūs į ekshaliacijos iš medžiagų be tokių pelenų greičius.

Radono ekshaliacijos greitis iš Honkonge vidaus apdailai naudojamo lengvojo betono yra nuo 1,6 iki 19 $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Yu, 1999).

Radono analizatoriumi buvo ištirta radono ekshaliacija iš 50 statybinių medžiagų, naudojamų Saudo Arabijoje, bandinių (Al-Jarallah, 2001). Šios medžiagos buvo smėlis, užpildas, cementas, gipsas, gesintos kalkės, keramikos gaminiai ir granitas. Nustatyta, kad didžiausia ekshaliacija yra iš granito. Ištirti 32 vietinių ir įvežtų granitų bandiniai. Ekshaliacijos greitis ploto vienetai iš granito bandinių buvo nuo mažesnio už mažiausią išmatuojamą lygį iki 10,6 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, vidurkis – 1,3 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Tiesinės koreliacijos tarp radono ekshaliacijos ir radžio savitojo aktyvumo koeficientas buvo 0,92. Normalizuotas radono ekshaliacijos greitis iš 2 cm storio granito bandinių buvo nuo mažesnio už mažiausią išmatuojamą lygį iki

0,068 (Bq·m⁻²·h⁻¹)/(Bq·kg⁻¹), vidurkis – 0,030 (Bq·m⁻²·h⁻¹)/(Bq·kg⁻¹). Nustatyta, kad iš tirtų granito bandinių į išorę išsiskyrė 21 % susidariusio radono. Daroma išvada, kad granitas gali būti radono patalpose ir urano grandinės radionuklidų gama spinduliuotės šaltinis.

(Lee, 2001) darbo duomenimis radono emanacijos greitis iš Korėjoje naudojamų statybinių medžiagų yra (0,0061 – 0,2404) Bq·kg⁻¹·h⁻¹. (El-Bahi, 2004) darbe nustatyta, kad radono ekshalicijos iš Egipte gaminamo betono greitis yra (61,19 – 181,39) Bq·m⁻² per parą. Radono išsiskyrimo į patalpas greitis trijuose skirtinguose pastatuose buvo 45, 232,8 ir 414,6 Bq·h⁻¹ (Tung, 2005).

Apskritai, radono emanacijos iš statybinių medžiagų greitis priklauso nuo tų pačių parametrų, kurie turi įtakos ir radono emanacijai iš grunto, t. y., medžiagos drėgmės ir jos poringumo (NCRP Nr. 103, 1989). Įtakos turi ir meteorologiniai parametrai – atmosferos slėgis ir temperatūra bei jų kitimai. Tačiau emanacijos iš daugelio rūšių betono, plytų ir gipso plokščių greitis yra mažas. Šį greitį sumažina ir dažai bei dekoratyvinės dangos, kuriomis padengiamos minėtos statybinės medžiagos.

Nustatyta, kad radono difuzija per medžiagas, o tuo pačiu ir jo ekshalicija iš statybinių medžiagų, priklauso nuo temperatūros gradiento šiose medžiagose (Minkin, 2003). Šiame darbe aprašomi rezultatai, gauti modeliuojant radono difuziją grunte ir betone. Radono difuzijos betone modeliavimo rezultatai pateikiami ir (Urosevi, 2003). Autoriai daro išvadą, jog žinant radono difuzijos betone koeficientą, galima numatyti, kokie radono tūriniai aktyvumai bus iš to betono pastatytame pastate. Įtaką radono ekshalicijai iš statybinių medžiagų gali turėti oro, kuriame yra radono srautas priešinga kryptimi – iš patalpų į statybines medžiagas (Jang, 2005).

(Richard, 2001) ir (Singh, S.; Singh, J., 2005) darbuose teigiama, jog radono ekshalicijai didelę reikšmę gali turėti ir tai, kuo padengtas medžiagos, iš kurios radonas išsiskiria, paviršius.

Tiriant, kokią įtaką radono ekshalicijai iš statybinių medžiagų turi jų danga, portlandcementis buvo sumaišomas su radžio chloridu (Takriti, 2001). Paruoštuose radžio chlorido tirpaluose (šaltiniuose) radžio savitieji aktyvumai buvo 1200, 2400 ir 3600 Bq·kg⁻¹. Buvo tirama, kaip radonas išsiskiria iš šių šaltinių, prieš juos uždengiant ir uždengus skirtingo storio (1, 2 ir 4 cm) cemento sluoksniais. Tyrimo rezultatai parodė, kad iš šaltinio radono išsiskyrė mažiau negu jį padengus cementu ir išsiskiriantis kiekis nepriklausė nuo cemento sluoksnio, dengiančio šaltinį, storio. Šaltiniai prieš juos padengiant cementu buvo apvynioti plona polietileno plėvele. Šis polietileno sluoksnis susilpnino radono ekshaliciją. Be to, polietilenas neleido prasidėti cheminei reakcijai tarp šaltinio ir cemento šiam kietėjant. Tai, kad šaltinį padengus cementu, padidėja radono ekshalicijos greitis, galima paaiškinti tuo, kad šis greitis padidėja dėl cheminių reakcijų tarp šaltinio ir betono.

(Yahong, 2002) darbo duomenimis radono ekshaliacijos iš glazūruotų plytelių, naudojamų vidaus apdailai, paviršiaus greitis yra nuo 10^{-3} iki 10^{-4} Bq·m⁻²·s⁻¹. Šiame ir kituose panašiuose darbuose nustatyta, jog plytelių glazūra gali sumažinti radono ekshaliacijos iš jų greitį.

Radono išsiskyrimas iš statybinių medžiagų priklauso ir nuo šių medžiagų fizinių savybių. Pavyzdžiui, plytų, plokščių ir cemento gamyboje gali būti naudojama anglis ir lengvieji pelenai, kuriuose degant angliai kaupiasi ²²⁶Ra. Todėl buvo pradėti matuoti radono savitieji aktyvumai lengvuosiuose pelenuose.

Anglies ir lengvųjų pelenų bandiniai buvo surinkti iš skirtingų šiluminių elektrinių Indijos šiaurėje, cemento bandiniai gauti iš Nacionalinės cemento ir statybinių medžiagų tarybos. Šiuose bandiniuose buvo tiriami radono aktyvumai. Iš gautų duomenų buvo apskaičiuota metinė efektinė dozė ir mirties nuo radono sukulto vėžio tikimybė. Radono tūriniai aktyvumai anglies bandiniuose buvo nuo (433±28) Bq·m⁻³ iki (2086±28) Bq·m⁻³, lengvuosiuose pelenuose – nuo (748±28) Bq·m⁻³ iki (1417±111) Bq·m⁻³ ir cemento bandiniuose – nuo 158 Bq·m⁻³ iki 1810 Bq·m⁻³ (vidurkis – 624±169 Bq·m⁻³) (Kant, 2001).

Kitame darbe gauta, kad anglies bandiniuose radono tūriniai aktyvumai buvo nuo 454 Bq·m⁻³ iki 1348 Bq·m⁻³, radono ekshaliacijos greitis masės vienetui – nuo 37 mBq·kg⁻¹·h⁻¹ iki 109 mBq·kg⁻¹·h⁻¹, o radono ekshaliacijos greitis paviršiaus ploto vienetui – nuo 323 mBq·m⁻²·h⁻¹ iki 959 mBq·m⁻²·h⁻¹. Lengvųjų pelenų bandiniuose radono tūriniai aktyvumai buvo nuo 1059 Bq·m⁻³ iki 1387 Bq·m⁻³, radono ekshaliacijos greitis iš masės vieneto – nuo 41 mBq·kg⁻¹·h⁻¹ iki 54 mBq·kg⁻¹·h⁻¹, o radono ekshaliacijos greitis iš paviršiaus ploto vieneto – nuo 720 mBq·m⁻²·h⁻¹ iki 943 mBq·m⁻²·h⁻¹. Radono tūriniai aktyvumai cemento bandiniuose buvo nuo 229 Bq·m⁻³ iki 605 Bq·m⁻³, radono ekshaliacijos iš masės vieneto greitis - nuo 8,4 mBq·kg⁻¹·h⁻¹ iki 22 mBq·kg⁻¹·h⁻¹, o radono ekshaliacijos greitis iš paviršiaus ploto vieneto – nuo 149 mBq·m⁻²·h⁻¹ iki 392 mBq·m⁻²·h⁻¹ (Chauhan, R. P.; Kant, K., 2001).

(Lukuttsova, 2001) darbe daroma išvada, kad būtini radono tūrinių aktyvumų matavimai, patalpose, kur naudotos statybinės medžiagos su pramonės atliekomis, tokiomis kaip pelenai ar šlakas.

Kai kurios statybinių medžiagų priemonės radono emanacijos greitį iš statybinių medžiagų gali ir sumažinti. (Lau, 2003) darbe pateikiami duomenys apie tai, kad į iš granito skaldos pagamintą betoną įdėjus metakaolino, sumažėja betono poringumas, o tai 30 % sumažina radono ekshaliacijos greitį. Naudojant standartinio kambario modelį, apskaičiuota, kad iš tokio betono pastatytoje patalpoje radono bus tik 9 Bq·m⁻³, laikant, kad betonas yra vienintelis radono šaltinis patalpoje.

(Takriti, 2004) darbe aprašomi rezultatai, gauti tiriant radono ekshaliaciją iš portlandcemenčio ir smėlio, sumaišytų su radžio chloridu. Nustatyta, kad radono ekshaliacijos greitis priklauso nuo smėlio kiekio mišinyje bei nuo smėlio dalelių dydžio. Autoriai tai paaiškina tuo, kad tirtuose bandiniuose yra uždarnos ertmės, kuriose radonas suskyla prieš išsiskirdamas į bandinio išorę.

Kartais radono ekshaliacijos iš statybinių medžiagų greitis gali būti gana didelis. JAV identifikuotas betonas, pasižymintis didžiausiu radono ekshaliacijos greičiu. Tačiau net ir tada pagrindinis radono šaltinis netoli nuo grunto esančiose patalpose yra ne statybinės medžiagos, o gruntas (NCRP Nr. 103, 1989). Padėtis kitokia, kai šios patalpos nuo grunto yra toliau, tai yra, aukščiau.

Yra ir priemonių, kuriomis galima sumažinti radono tūrinius aktyvumus patalpose, kai pagrindinis radono šaltinis yra statybinės medžiagos. Skirtingai nuo atvejo, kai pagrindinis radono šaltinis yra gruntas, padėti gali ir patalpų vėdinimas (Clavensjo, 1999).

(Leung, 1999) darbe aprašomas radono tūrinių aktyvumų daugiaaukščiuose pastatuose sumažinimo tyrimas. Analizuota, kokią įtaką slėgio sumažinimas turi radono ekshaliacijos iš statybinių medžiagų greičiui. Atliekant tyrimus, sienose buvo įrengti tuneliai ir iš jų buvo siurbiamas radonas. Matuojant radono ekshaliacijos greitį, buvo registruojamas slėgis patalpose, atstumas tarp tunelių, tunelių gylyai ir sienų storiai. Naudojantis tokiais tuneliais ir sumažinus slėgį, radono ekshaliacijos greitis žymiai sumažėjo. Pavyzdžiui, radono ekshaliacijos iš 20 cm storio sienos, kurioje vienas nuo kito 70 cm atstumais yra tuneliai, greitį galima sumažinti 60 %, slėgį sumažinus 67 kPa (20 mm Hg). Šiame darbe pateikiami praktiniai būdai, kuriais galima sumažinti radono tūrinius aktyvumus daugiaaukščiuose pastatuose.

Sugertosios dozės galios padidėjimas vienetiniam radono tūrinio aktyvumo padidėjimui yra nevienareikšmis. Skirtingoms patalpoms gautos jo reikšmės yra nuo 0,006 iki 0,06 (nGy·h⁻¹)/(Bq·m⁻³)⁻¹. (Risica, 2001) darbe gauta reikšmė yra 0,01 (nGy·h⁻¹)/(Bq·m⁻³)⁻¹, (Leung, 1998) – (0,15–0,18) (nGy·h⁻¹)/(Bq·m⁻³)⁻¹. Visos šios reikšmės yra panašios, skirtingose patalpose jos gali skirtis maždaug viena eile.

Radonas, išsiskyręs iš statybinių medžiagų, irgi gali būti svarbus apšvitos šaltinis. Dėl tos priežasties būtina įvertinti, kokią įtaką radono tūriniais aktyvumams gali turėti statybinės medžiagos, ypač jeigu radžio savitasis aktyvumas statybinėse medžiagose yra didelis – artimas arba viršija 200 Bq·kg⁻¹.

1.2.3. Statybinių medžiagų tarša dirbtinės kilmės radionuklidais

Gaminant statybines medžiagas, gamtinės kilmės radionuklidai į jas patenka su žaliavomis, kuriose būna uolienoms ir gruntams būdingi gamtinės kilmės radionuklidų savitieji

aktyvumai. Tačiau kartais šių gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai žaliavose gali būti labai dideli. Dėl įvairių technologinio pobūdžio priežasčių gamtinės kilmės radionuklidai medžiagose koncentruojasi, t. y., tokias medžiagas galima laikyti gamtinės kilmės radioaktyviosiomis medžiagomis (*angl. naturally occurring radioactive materials, NORM*). Tokią statybinių medžiagų taršą galima laikyti dirbtine arba antropogenine, nes radionuklidų aktyvumai jų žaliavose būna „sukurti“ dirbtinai, nors radionuklidai yra gamtinės kilmės. Todėl šiame skyriuje, skirtame dirbtinei statybinių medžiagų taršai, pateikiama informacija ir apie tokią taršą gamtinės kilmės radionuklidais.

Mažiausiai aštuonių judrių gatvių arba apytikriai 35 % visų viešosios paskirties kelių dangoje, Taivanyje 1994 metais atsitiktinai buvo aptikta neįprastai dideli radionuklidų aktyvumai (Chang, 2001). Susmulkintų uolienų nuolaužos ir stambus smėlis, atskirtas nuo asfalto dangos, buvo ištirtas gama spektrometriškai. ^{232}Th savitasis aktyvumas (vertinant pagal išmatuotą ^{228}Ac aktyvumą) ir ^{238}U savitasis aktyvumas (vertinant pagal ^{214}Bi aktyvumą) kai kuriuose bandiniuose atitinkamai buvo net iki 4000 ir 1000 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Dozės galia prie kelio paviršiaus buvo apie $1,3\ \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ (palyginus su foniniu lygiu $0,08\ \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$). Šis neįprastai aukštas aktyvumas buvo gautas atsitiktinai sumaišius kelio statybines medžiagas su medžiagomis, turinčiomis didelius ^{232}Th ir ^{238}U savituosius aktyvumus.

Taivanyje buvo užregistruota didelė dozės galia ($(0,5 - 120)\ \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) vienos ligoninės patalpose. Ištyrus buvo nustatyta, kad tai yra dėl ^{60}Co , esančio statybinėse konstrukcijose, jonizuojančiosios spinduliuotės. ^{60}Co pateko į konstrukcijų plieną perdurbant metalo laužą, kuriame buvo nežinomos kilmės ^{60}Co šaltinis. Naudojant šį plieną namų konstrukcijoms buvo pastatyta mokyklų, ligoninių, gyvenamųjų namų (Hwang, 2001).

Problema, kai jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniai gali atsitiktinai pakliūti į statybinių medžiagų žaliavas, nėra specifinė statybinių medžiagų problema. Tokie šaltiniai patenka į perlydomą metalo laužą, o po to – į gaminius, pagamintus iš perlydyto metalo. Ji sprendžiama imantis prevencinių priemonių – kontroliuojant jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinius, imantis fizinės jų apsaugos priemonių, matuojant dozės galią metalo laužo surinkimo ir perlydymo vietose.

Nors apšvita nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės siejama su gamtinės kilmės radionuklidais, būtina žinoti, jog ši apšvita gali būti ir nuo dirbtinės kilmės radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės. Nors tokie atvejai yra reti, visiškai atmesti jų galimybės negalima. Atliekant statybinių medžiagų tyrimus, galima užregistruoti ne tik gamtinės kilmės radionuklidus. Todėl, pavyzdžiui, visų statybinių medžiagų gama spektrometrijos matavimų protokolus būtina analizuoti, siekiant, kad visos spektrometrinės smailės būtų identifikuotos.

1.2.4. Gamybos procesų atliekų panaudojimo statybinių medžiagų gamybai problemos

Su dirbtine statybinių medžiagų tarša gamtinės kilmės radionuklidais artimai susijusi ir technologinių procesų šalutinių produktų (atliekų) statybinėse medžiagose problema.

Statybinių medžiagų gamybai vis dažniau ir dažniau naudojamos įvairių technologinių procesų atliekos. Šios atliekos naudojamos dėl to, kad galutiniam produktui jos suteikia tam tikras savybes, ir dėl to, kad tų atliekų atsiranda tiek daug, jog tenka ieškoti būdų kaip jas panaudoti. Jos yra pigios ir jomis galima pakeisti kitas žaliavas, pavyzdžiui, smėlį. Tokių atliekų panaudojimą skatina ir aplinkosaugos reikalavimai. Tačiau kartais tai gali atnešti ir nepageidautinų pasekmių – gali atsirasti statybinių medžiagų ir statybos produkcijos su dideliais gamtinės kilmės radionuklidų savitaisiais aktyvumais.

Su apšvita susijusių problemų gali atsirasti statybinių medžiagų gamybai naudojant netgi įprastas žaliavas, pavyzdžiui, susmulkintas uolienas. Smulkinant uolienas gali atsiskirti jų frakcijos su didesniais gamtinės kilmės radionuklidų savitaisiais aktyvumais. Iš šių frakcijų pagaminus statybines medžiagas, apšvitos nuo jose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės bus didesnės. Dar labai mažai žinoma apie apšvitą nuo jonizuojančiosios spinduliuotės radionuklidų, esančių susmulkintose granito ir tufo kasyklų atliekose, panaudotose statybinių medžiagų gamybai (IAEA Nr. 419, 2003).

Lengvasis arba aeruotas betonas gaminamas naudojant beveik tas pačias žaliavas, kaip ir įprastinis betonas, tačiau gaminant lengvąjį betoną yra įmaišoma nedaug skalūnų miltelių. Dėl tos priežasties kai kurių rūšių lengvajame betone yra daugiau gamtinės kilmės radionuklidų.

Deginant anglį, pasaulyje kasmet atsiranda daugiau kaip 280 milijonų tonų pelenų. Apie 40 milijonų tonų jų sunaudojama plytoms ir cementui gaminti (ICRP 82 1999). Didelė tokių pelenų dalis neatitinka tam tikrų techninių reikalavimų, todėl gaminant statybines medžiagas, jie maišomi su „švariomis“ žaliavomis.

Pelenai, atsiradę degant angliai, naudojami ir lengvojo betono gamybai (Gesell, 1975). Kadangi šiuose pelenuose būna didesni gamtinės kilmės radionuklidų savitiesi aktyvumai, iš tokio betono pastatytuose namuose gyvenantys žmonės gauna didesnes apšvitos dozes. Yra šalių, kuriose nustatyti specialūs reikalavimai radionuklidų savitiesiems aktyvumams lengvajame betone.

Pietų Afrikoje namų statybai kartais naudojamos kasyklų atliekos, atsirandančios kasant aukso rūdą. Nustatyta, kad dėl to per metus gaunamos efektinės dozės yra 20 μSv (dėl statybinėse medžiagose esančių gamtinės kilmės radionuklidų išorinės gama spinduliuotės) ir 80 μSv (dėl iš statybinių medžiagų išsiskyrusio radono) (De Beer, 1998).

Tokiose smėlio rūšyse, kaip monazitas ((Ce,La,Y,Th)PO₄), ilmenitas (FeTiO₃), ksenotimas (YPO₄), naudojamuose įvairių metalų gamybai, dažnai yra dideli gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai. Iš jų išskyrus metalus, atliekos kartais naudojamos statybinėms medžiagoms gaminti.

Perdirbant aliuminio žaliavą boksitus (Al₂O₃·2H₂O), susidaro raudonasis molis – netirpių boksitų mišinys su geležimi, siliciu ir titanu. Raudonajame molyje būna ir palyginti didesni gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai. Raudonasis molis kelia sudėtingų problemų, kadangi jo susidaro labai daug – daugiau kaip 70 milijonų tonų per metus visame pasaulyje (Hausberg, 2000). Anksčiau jis buvo naudojamas statybose (Pinnock, 1999), nors kai kuriais atvejais dėl to žmonės gaudavo papildomą apšvitą, apie kurią tada dar nebuvo žinoma.

Gaminant geležį susidaro geležies šlakas, kuriame yra didesni urano savitieji aktyvumai. 18 % šio šlako JAV buvo sunaudojama gaminti cementui (United States Geological Survey, 2001). Šlakas buvo naudojamas ir tarpams tarp skirtingų aukštų grindų ir lubų užpildyti. Naudojamas ir palyginti daug ²²⁶Ra (100 – 200 Bq·kg⁻¹) turintis geležies gamybos metu susidaręs šlakas. Žmonių apšvitą nuo šiame šlake esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės riboja tai, jog jis yra beveik nepralaidus dujoms, todėl iš jo išsiskiria nedaug radono.

Pasitaiko, kad statybose naudojamos iš vandens telkinių dugno iškeltos medžiagos, pavyzdžiui, iškastos gilinant uostų akvatorijas. Kai kuriose dugno vietose dėl geocheminių procesų kaupiasi metalai, tarp jų ir gamtinės kilmės radionuklidai, todėl kai kur tokiose dugno nuosėdose gali būti didesni jų savitieji aktyvumai.

Daug gamtinės kilmės radionuklidų turintis ferofosforas, atsirandantis apdorojant fosfatus, kartais naudojamas dažų pigmentų gamybai (US Environmental Protection Agency, 1989).

Sieros rūgšties gamybos metu susidarančiame kalcine yra (5 – 50)·10⁴ Bq·kg⁻¹ gamtinės kilmės alfa spindulių (De Beer, 1993). Yra duomenų, kad kalcinas naudojamas šaligatvių plytelėms dažyti ir dažams gaminti.

Geoterminiu būdu gaminant energiją, vamzdžiuose, siurbliuose ir kitur susikaupia dideli nuosėdų kiekiai, kuriose yra gamtinės kilmės radionuklidų. Yra užregistruota atvejų, kai šios nuosėdos Jungtinėse Amerikos Valstijose buvo maišomos su cementu ir naudojamos gaminti plytoms (Lund, 1995).

(Lei Min, 2001) darbe pateikiama informacija apie gamtinės kilmės radionuklidų savitųjų aktyvumų anglyje tyrimus Kinijoje. Buvo ištirti anglies bandiniai iš anglies telkinių Guizhou ir dalyje anglies kasyklų Guiyang. Darbe analizuojami anglies šlako naudojimo statybinių medžiagų gamyboje socialiniai ir ekonominiai privalumai. Taip pat diskutuojama apie gamtinės kilmės radionuklidų savituosius aktyvumus anglies šlake ir pelenuose, jų kiekio kontrolę ir

problemas, kylančias anglies šlaką naudojant statybinių medžiagų gamyboje, ir priemonės mažinant radioaktyviąją taršą gamtinės kilmės radionuklidais.

Viena žinomiausių ir plačiausiai naudojamų žaliavų, iš kurių gaminant statybines medžiagas, jose atsiranda daug gamtinės kilmės radionuklidų, yra fosfogipsas.

Fosfogipsas susidaro perdirbant fosfatus. Iš kai kurių telkinių išgautuose fosfatuose yra daug urano arba torio. Siekiant iš fosfatų išgauti fosforo rūgštį, fosfatai arba apatitai $((\text{Ca}_3\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}_2)$ apdorojami rūgštimis. 95 % atvejų tai būna sieros rūgštis. Fosfatų ir sieros rūgšties reakcijos metu susidaro gipsas $(\text{CaSO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O}$. Gipsas nėra tirpus, todėl jį nesunku išskirti iš gauto tirpalo.

Fosfogipse lieka 80 % ^{226}Ra , 30 % ^{232}Th ir 18 % ^{238}U (Vandenhove, 2000), (Baetsle, 1991), (Hull, 1969). Gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai įvairiose fosfogipso rūšyse būna įvairūs (1.3 lentelė).

1.3 lentelė. Gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai įvairiose fosfogipso rūšyse (IAEA Nr. 419, 2003)

Kilmės šalis ir vieta	Savitasis aktyvumas, $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$				
	^{226}Ra	^{238}U	^{210}Pb	^{210}Po	^{232}Th
JAV (Burnett, 1995)					
Pietų ir centrinė Florida	507–1358	41–366	577–1853	437–1765	11
Šiaurės Florida	270–599	22–451	348–551	355–566	10
Europa (Schmidt, 1995), (Scholten, 1996), (Penfold, 1999)	15–1700	500	1300	900	10
Pietų Afrika (Lalkhan, 2001)					
Vietinės uolienos	45–48	64–73	76–132		205–284
Togo uolienos		17			61

Kadangi fosfogipso susidaro daug, jis naudojamas ir statybinėms medžiagoms gaminti. Kai kur, pavyzdžiui, JAV, Belgijoje ir Rumunijoje tam naudoti fosfogipsą uždrausta (US Environmental Protection Agency, 1990), (Botezatu, 2002). 1996 metų duomenimis kasmet Europos Sąjungoje buvo utilizuojama apie 2 milijonus tonų fosfogipso (apie 15 % bendro jo kiekio) (Vandenhove, 2000).

Dažnai apie tai, jog statybinių medžiagų žaliavose gali būti didesni gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai, jų gamintojai nežino. Todėl labai svarbu atlikti žaliavų radiologinius tyrimus. Paprastai atliekami pačios produkcijos tyrimai. Nors tokių tyrimų rezultatai daug pasako apie galimą galutinio produkto įtaką žmonių apšvitai, prarandama informacija apie gamybos metu vykstančius procesus, turinčius įtakos gamtinės kilmės radionuklidų savitiesiems aktyvumams statybos gaminiuose.

Pavyzdžiui, apdirbant molį, kuriame dėl sorbcijos ant molio dalelių paviršių yra nusėdę daug urano, radionuklidai gali koncentruotis tik tam tikruose produktuose arba jų gamybos atliekose (IAEA Nr. 419, 2003). Be to, radionuklidai gali koncentruotis ir tam tikrose vietose bei

tokių technologinių procesų, kaip dalelių rūšiavimas pagal dydį ar flotaciją, metu. Išdegant statybos produkciją, iš jos gali išgaruoti, pavyzdžiui, ^{210}Po (National group for studying the radiological implications in the use of zircon sand, 1985). Dėl to šis radionuklidas kaupiasi dulkių išmetimo sistemose, nusėda ant dūmtraukių sienų.

Kaip matyti, naudojant atliekas statybinių medžiagų gamybai, atsiranda ne tik technologinių, bet ir su radiacine sauga susijusių problemų.

Sprendžiant šias problemas, labai svarbu surasti statybines medžiagas ar jų žaliavas, kuriose dėl technologinių procesų atliekų panaudojimo gali būti didesni gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai. Kartais šios medžiagos ar žaliavos gali būti sunkiai identifikuojamos.

1.2.5. Apšvitos nuo radionuklidų, esančių statybinėse medžiagose, jonizuojančiosios spinduliuotės dozės

Galutinis statybinių medžiagų radiologinių tyrimų tikslas yra nustatyti, kokių optimalių radiacinės saugos priemonių reikia imtis, kad apšvita nuo šiose medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės būtų priimtino lygio. Priimtino lygio nustatymas irgi yra radiacinės saugos optimizavimo dalis. Šis lygis priklauso nuo šalies socialinių ir ekonominių sąlygų, o tai reiškia, kad kiekviena valstybė apsaugos nuo statybinių medžiagų apšvitos (kaip ir visų kitų apšvitos šaltinių) sistemą privalo kurti atsižvelgdama į tai, kiek resursų galima skirti apšvitos mažinimui. Todėl radiacinės saugos optimizavimas yra dvipusis procesas, kuriame vienodai svarbu tiek nustatyti optimizavimo lygius, tiek identifikuoti praktines radiacinės saugos priemones.

Radiacinės saugos priemonės nustatomos remiantis gamtinės kilmės (jeigu yra, ir dirbtinės kilmės) radionuklidų savitųjų aktyvumų matavimų rezultatais. Tarp priemonių identifikavimo ir gamtinės kilmės radionuklidų savitųjų aktyvumų nustatymo yra labai svarbus etapas – apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozių įvertinimas. Šiame skyriuje apžvelgiamos apšvitos dozės, kurias nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės gauna įvairių regionų ir šalių gyventojai, ir šių dozių įvertinimo būdai.

(Venturini, 1997) darbe aprašyti gama spektrometriniai tyrimai, kurių metu buvo tiriama gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai San Paule plačiausiai naudojamose statybinėse medžiagose. Buvo įvertinta ir dozės galia bei išorinės ir vidinės apšvitos nuo statybinių medžiagų gamtinės kilmės radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės.

Brazilijoje, Rio Grande de Norte provincijoje 244 butuose ir darbo vietose buvo atlikti matavimai naudojant portatyvinį scintiliacinį matuoklį. Matuota pastatuose, pastatytuose iš tirtų

statybinių medžiagų. Sugertosios dozės galios reikšmės įvairiose vietose buvo nuo $59 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$ iki $149 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$ (Malanca, 1993).

167 namuose Belgrade buvo išmatuoti radono tūriniai aktyvumai ir lygiavertės dozės galios reikšmės (Popovic, 1996). Radono tūrinių aktyvumų matavimams naudoti alfa scintiliatoriai. Šie aktyvumai buvo nuo 10 iki $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ir priklausė nuo statybinių medžiagų, kurios, savo ruožtu, susijusios su namų amžiumi. Nustatytas vertikalusis radono tūrinių aktyvumų pasiskirstymas. Įvertinta vidutinė metinė efektinė apšvitos nuo radono ir jo skilimo produktų dozė, kuri yra $1,3 \text{ mSv}$.

Saudo Arabijoje apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozių įvertinimas buvo atliekamas naudojant CaSO_4 : Dy dozimetrus. Nustatyta, kad dozės galia įvairiose patalpose tame pačiame mieste buvo nuo 90 iki $221 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$ ir priklausė nuo pastato ypatybių ir metų laiko (Al-Ghorabie, 2005). Didžiausia vidutinė dozės galia ($192 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$) užfiksuota betoniniuose ir plytiniuose pastatuose, mažiausia ($92 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$) – moliniuose namuose. Vidutinė metinė sugertoji dozė, kurią gauna tirtų patalpų gyventojai, yra $1,211 \text{ mGy}$.

Atlikus gamtinės kilmės radionuklidų savitųjų aktyvumų gama spektrometrinius matavimus cemente, smėlyje ir tuščiaviduriuose betono blokuose, naudojamuose Bangladeše, Dakoje, nustatyta, kad metinė efektinė apšvitos nuo dėl šių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozė neturėtų viršyti $0,3 \text{ mSv}$ (Roy, 2005).

Svarbus darbuotojų ir gyventojų apšvitos šaltinis gali būti fosfogipso tinko plokštės ir tinko cementas, naudojami pastatuose vietoje natūralaus gipso. Apšvita gali atsirasti tiek dėl radono, išsiskyrusio iš fosfogipso, tiek fosfogipse esančių radionuklidų beta ir gama spinduliuotės. (O'Brien, 1997) darbe pateikiamų skaičiavimų rezultatai rodo, kad jeigu $(5\times 5\times 3) \text{ m}^3$ kambario sienos ir lubos padengtos 1 cm storio fosfogipso, kuriame yra $400 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^{226}Ra , plokštėmis, metinė efektinė žmogaus, kuris nuolat būna tokiame kambaryje, dozė bus apie $0,13 \text{ mSv}$. Ši dozė artima vidutinei dozei, kurią Australijos gyventojai gauna savo namuose. Metinė efektinė nuo tokiose plonose fosfogipso plokštėse esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozė yra tiesiogiai proporcinga ^{226}Ra savitajam aktyvumui gipso plokštėje.

Žmonių išorinės ir vidinės apšvitos dėl statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės svarba parodyta (Stoulos, 2003) darbe. Jame taikyta kompleksinė metodika. Didelės skiriamosios gebos gama spektrometru buvo matuojami gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai statybinių medžiagų bandiniuose. Radono ekshalicijos greitis buvo matuojamas uždarius tiriamą bandinį į hermetišką konteinerį ir stebint, kaip didėja radono aktyvumas jame. Analizuotos dažniausiai naudojamos statybinės medžiagos. Apskaičiuota

metinė tipiško graikiško būsto gyventojų apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozė (Stoulos, 2002).

Atlikus gamtinės kilmės radionuklidų savitųjų aktyvumų ir radono ekshalacijos greičių matavimus, nustatyta, kad įprastiniuose Graikijos pastatuose gyvenančių žmonių apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės metinė efektinė dozė yra (0,27 – 0,71) mSv (vidurkis – 0,7 mSv) (Papastefanou, 2004).

1992 – 1993 ir 1993 – 1994 metų žiemomis atlikti radono tūrinių aktyvumų ir dozės galios matavimai 890 mokyklų Slovėnijoje, kuriose mokosi apie 280 000 mokinių. Radono tūrinių aktyvumo matavimo uždarytame kambaryje trukmė buvo 12 valandų. Gama dozės galia buvo matuojama portatyviniu scintiliaciniu matuokliu. Aritmetinis dozės galios vidurkis buvo $102 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$, geometrinis – $95 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$. Labai didelių verčių neužfiksuota (Vaupotic, 2000).

Kaip minėta, statybinių medžiagų tinkamumas kartais vertinamas apskaičiuojant radžio lygiavertį aktyvumą. Kadangi šis aktyvumas apytikriai atspindi apšvitos nuo statybinių medžiagų radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozę, darbe (Amrani, 2001) buvo apskaičiuoti tirtų statybinių medžiagų bandinių radžio lygiaverčiai aktyvumai. Visų medžiagų radžio lygiavertis aktyvumas buvo mažesnis už leistiną ($370 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$), atitinkantį 1,5 mSv išorinės apšvitos efektinę dozę per metus.

Apšvitos nuo gama spinduliuotės dozė yra proporcinga ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K savitiesiems aktyvumams įvairių rūšių molyje (Dodona, 2000). Albanijoje ji neviršija rekomenduojamųjų gama dozės galios lygių, todėl Albanijos molis be apribojimų gali būti naudojamas statybinėms medžiagoms.

Kipre tiriant įvairių rūšių granito bandinius, nustatyta, kad apšvitos nuo juose esančių ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K jonizuojančios spinduliuotės ore sugertosios dozės galia priklauso nuo to, kokią pastatui naudojamų statybinių medžiagų dalį sudaro granitai. Kai granitas naudojamas kaip užpildas, dozės galia pastato viduje yra nuo 7 iki $1209 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$. Kai jis sudaro pusę pastatui naudojamų statybinių medžiagų – nuo 4 iki $605 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$, kai sudaro ketvirtį – nuo 2 iki $302 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$. Gyventojų gaunama metinė efektinė dozė patalpose buvo nuo 0,02 iki 2,97 mSv, kai tokios medžiagos sudarė pusę visų pastato statybinių medžiagų. Taikant paviršiaus medžiagoms dabartinius dozės kriterijus, rekomenduojamus Europos Sąjungos, nustatyta, kad naudojant 25 granito rūšis, metinė efektinė dozė neviršys 0,3 mSv, dvi rūšis – 1 mSv ir tik vieną – viršys 1 mSv (Tzortzis, 2003).

Indijoje, Gudalore, termoluminiscenciniais dozimetrais ištisus metus gyvenamuosiuose pastatuose matuojant dozes, buvo pastebėti žymūs sezoniniai svyravimai (Sivakumar, 2002). Didžiausia dozės galia buvo vasarą, mažiausia žiemą. Dozės galia buvo nuo 77,9 iki $229,3 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$. Tai gali būti susiję su statybinių medžiagų tipu. Apskaičiuota, kad vidutinė metinė

lygiavertė dozė buvo nuo 477,6 μSv namuose iš šlako iki 1406,3 μSv per metus namuose iš plytų ir cemento.

Bangladeše, Dakos regione, termoluminescenciniais dozimetrais atlikus dozių matavimus pastatuose, nustatyta, kad dozės galia juose svyruoja, o svyravimus galima aprašyti lygtimi (Idrish Miah, 2004)

$$d = 160 + 65 \cos \pi / 6(m - 1), \quad (1.2)$$

čia d – dozės galia, $\text{nGy} \cdot \text{h}^{-1}$, m – mėnesio numeris.

Svyravimą darbo autorius aiškina patalpų vėdinimo intensyvumo svyravimais. Vidutinė efektinė dozė, kurią žmonės gauna per metus tokios patalpose, yra 0,86 mSv.

(Zalewski, 2001) darbe nustatyta, kad žmonės, gyvenantys iš skirtingų medžiagų pastatytuose namuose Lenkijoje, per metus nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės turėtų gauti tokias efektines dozes: iš lengvojo betono – 0,24 mSv, iš silikatinų plytų – 0,18 mSv, iš betono – 0,25 mSv, iš šlako betono – 0,86 mSv, keraminių plytų – 0,71 mSv.

(Zaidi, 1999) darbe pateikiami rezultatai, gauti tiriant gamtinės kilmės radionuklidų savituosius aktyvumus statybinėse medžiagose, kurių bandiniai buvo surinkti iš Rawalpindi ir Islamabado regionų Pakistane. Nustatyta, kad metinės efektinės apšvitos nuo visose tirtose medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės neviršija 1,5 mSv.

(Khan, 2001) darbe pateikiami rezultatai, gauti analizuojant Pakistane naudojamų plytų bandinius. Nustatyta, kad per metus žmonės gali gauti nuo 0,3 iki 0,35 mSv efektinę dozę. (Farai, 2001) darbe nurodoma, kad betoniniuose pastatuose Nigerijoje gyvenančių žmonių metinė efektinė dozė yra 0,412 mSv. Tos pačios šalies Ibadano mieste atliktų tyrimų duomenimis nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės gaunamos apšvitos efektinė dozė yra 0,236 mSv per metus (Ademola, J. A.; Oguneletu, P. O., 2005).

Apšvitos nuo Japonijoje naudojamame cemento esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės vidutinė metinė efektinė dozė 1 metro atstumu nuo cemento paviršiaus yra 0,318 mSv (Suzuki, 2000). Autoriai daro išvadą, kad ši apšvita yra mažesnė negu kitose šalyse. (Sam, 2001) darbe nurodoma, kad atlikus gamtinės kilmės radionuklidų savitųjų aktyvumų vietinio ir importuoto į Jordaną cemento bandiniuose tyrimus, nustatyta, jog metinė efektinė apšvitos nuo šiamo cemento esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozė gali būti nuo 0,19 iki 0,30 mSv.

Kaip matyti, apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozė gali būti įvairi – metinė efektinė dozė gali būti nuo maždaug 0,2 iki 3 mSv. Ši dozė priklauso nuo radionuklidų savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose, šių medžiagų kiekio

pastate, laiko, kurį žmogus praleidžia tokiaame pastate, pastato vėdinimo intensyvumo. Todėl įvairiose šalyse ir regionuose stengiamasi nustatyti tipines apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės reikšmes.

Vienareikšmiškai nustatyti apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės įvairiose šalyse yra sunku todėl, kad pateikiamos ore sugertosios dozės galios patalpų viduje reikšmės. Sugertosios dozės galia ore patalpose nėra taip gerai ištirta kaip dozės galia lauke. Šiuo metu turimi duomenys tik apie 45 % pasaulio gyventojų apšvitą (UNSCEAR, 2000)). 1.4 lentelėje yra pateikiami duomenys iš kai kurių Europos šalių.

1.4 lentelė. Ore sugertosios dozės galia patalpų viduje (UNSCEAR, 2000)

Šalis	Ore sugertosios dozės galia, nGy·h ⁻¹	
	Vidurkis	Intervalas
Danija	54	19 – 260
Suomija	73	22 – 184
Islandija	23	14 – 32
Lietuva	85	34 – 195
Norvegija	79	20 – 1250
Švedija	110	20 – 2000
Belgija	60	32 – 90
Vokietija	70	13 – 290
Airija	62	10 – 140
Nyderlandai	64	30 – 100
Šveicarija	62	20 – 200
Vengrija	95	11 – 236
Lenkija	67	28 – 167
Rumunija	83	30 – 170
Albanija	100	20 – 300
Graikija	67	36 – 131
Portugalija	101	4 – 280
Ispanija	110	57 – 180
Slovėnija	75	40 – 250

Pasaulinis svertinis vidurkis yra 84 nGy·h⁻¹ (UNSCEAR, 2000).

Analizuojamos ir apšvitos nuo senovėje naudotų statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės. Tokios analizės pavyzdys gali būti (Abo-Elmagd, 2006), kur aprašomi rezultatai, gauti tiriant vidinę ir išorinę apšvitą senovinėse laidojimo vietose Sakroje, Egipte. Nustatyta, kad vidinės apšvitos metinė efektinė dozė gali siekti 28,83 mSv. Išorinės apšvitos metinė efektinė dozė yra 21,43 mSv. Šios abi dozės žymiai viršija rekomenduojamąjį lygį darbuotojams, dirbantiems laidojimo vietose.

Informacija apie tipines apšvitos nuo statybinių medžiagų (kaip ir kitų apšvitos šaltinių) dozės reikšmes padeda nustatyti statybinių medžiagų kaip apšvitos šaltinio svarbą, identifikuoti statybines medžiagas, kuriose esančių radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė sukelia daug didesnę negu tipinę apšvitą, palyginti apšvitos nuo vienu ar kitu statybinių medžiagų dozės tiek

tarpusavyje, tiek su tipinėmis reikšmėmis. Šią informaciją kaupiant, periodiškai atnaujinant ir tikslinant, galima nustatyti apšvitos nuo statybinių medžiagų kitimo tendencijas ir priemonių, naudojamų šiai apšvitai sumažinti, efektyvumą, o tai yra būtina radiacinės saugos optimizavimo sąlyga.

1.3. Apšvitos nuo radionuklidų, esančių statybinėse medžiagose, jonizuojančiosios spinduliuotės ribojimas ir mažinimas

1.3.1. Apšvitos ribojimo principai. Reikalavimai radionuklidų savitiesiems aktyvumams statybinėse medžiagose įvairiose šalyse

Kiekvienoje srityje, kurioje naudojama arba žmones veikia jonizuojančioji spinduliuotė, šį panaudojimą būtina pagrįsti, o apsaugą nuo apšvitos būtina optimizuoti. Tie patys reikalavimai taikomi ir naudojant statybines medžiagas.

(Chen, 1993) darbe nurodoma, kad poreikis sukurti standartinę gamtinės kilmės radionuklidų savitųjų aktyvumų kontrolės statybinėse medžiagose sistemą atsiranda dėl to, kad vis daugiau dėmesio skiriama šiai problemai ir kad daugelis statybinių medžiagų gamintojų imasi priemonių, kad jų gaminiai būtų priimtini radiacinės saugos požiūriu.

Nustatyti optimalias dozes ir švitinamų žmonių skaičius yra sudėtinga. Problemą komplikuoja ir tai, jog statybines medžiagas susieti su apšvita sudėtinga ne tik jų gamintojams ar naudotojams, bet ir kai kurioms žmonių sauga ir sveikata besirūpinančioms institucijoms. Todėl dažnai naudojami tam tikri patikrinti ir vienu ar kitu lygiu (pavyzdžiui, šalių grupės) priimti apsaugos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės optimizavimo mechanizmai.

Pagal Europos Komisijos direktyvą (Council Directive 96/29 Euratom, 1996), nustatančią pagrindinius radiacinės saugos reikalavimus, būtina identifikuoti tas žmogaus veiklos sritis, kurias vykdant žmonės gali gauti dideles apšvitos dozes. Didelėmis dozėmis laikomos tokios dozės, kurias būtina mažinti. Viena iš tokių veiklos sričių yrastybinių medžiagų naudojimas.

Iš kitos pusės, vadinamojoje statinių direktyvoje (Council Directive 89/106/EEC, 1989) nurodoma, kad statiniai turi būti suprojektuoti ir pastatyti taip, kad iš jų sklindanti jonizuojančioji spinduliuotė nekeltų pavojaus nei jų naudotojų, nei šalia jų esančių žmonių sveikatai.

Pagrindinė problema yra susijusi su statybinių medžiagų priimtimumo radiacinės saugos požiūriu kriterijų, t. y., dydžių, kuriuos viršijus statybinės medžiagos radiacinės saugos požiūriu negali būti naudojamos, nustatymu.

Statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė gali sukelti tiek išorinę, tiek vidinę apšvitą. Nustatant statybinių medžiagų priimtino radiacinės saugos požįūriu kriterijus, svarbu atsižvelgti į šias abi apšvitos rūšis.

Nustatant apšvitos nuo gamtinės kilmės šaltinių dozių ribas, reikia kiek įmanoma tiksliau įvertinti, kokią įtaką šioms dozėms turi gamtinis fonas, pavyzdžiui, radionuklidų, natūraliai esančių grunte, spinduliuotė konkrečioje vietovėje. Pastarosios spinduliuotės įtaką galima įvertinti apšvitos nuo jos dozės vidurkiu.

Apšvitos nuo radono, į pastatų vidų patekusio iš statybinių medžiagų, dozę įvertinti daug sunkiau. Dažniausiai pagrindinis radono šaltinis yra po namu esantis gruntas (UNSCEAR, 2000). Statybinių medžiagų įtaka radono tūriniam aktyvumui patalpose paprastai nustatoma matematiniais modeliais, atsižvelgiant į ^{226}Ra savituosius aktyvumus statybinėse medžiagose, jų fizines savybes, patalpų tūrį, vėdinimo intensyvumą, radoną išskiriančio paviršiaus ploto ir patalpų tūrio santykį. Tačiau tokį metodą naudoti dažnai yra sudėtinga ne tik dėl modeliavimo sudėtingumo, bet ir dėl faktorių, į kuriuos sunku atsižvelgti, pavyzdžiui, medžiagos, kuria padengtas radoną išskiriantis paviršius, arba gyventojų elgesio patalpose, pavyzdžiui, patalpų vėdinimo intensyvumo kitimo.

Nustatant leistiną ^{226}Ra savitojo aktyvumo lygį statybinėse medžiagose, dažnai naudojamos radiacinės saugos konservatyvumo principu. Šis lygis turi būti toks, kad esant pačioms nepalankiausioms sąlygoms (geriausiomis sąlygoms radonui išsiskirti iš statybinių medžiagų ir kauptis patalpose), radono tūrinis aktyvumas neviršytų lygio, nustatyto naujiems pastatams – $200 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (Commission Recommendation 90/143/Euratom, 1990). Kartais nustatoma griežtesnė radono tūrinio aktyvumo riba, kadangi radonas patalpose atsiranda ir iš kitų šaltinių.

Radiacinės saugos optimizavimas reiškia, kad turi būti atsižvelgiama į tai, kokios tipinės apšvitos yra šalyje ar regione. Jeigu šalyje arba regione šios apšvitos metinės efektinės dozės vidurkis yra $0,2 \text{ mSv}$, rekomenduojama didžiausią leistiną apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės ribą nustatyti lygią $0,5 \text{ mSv}$. Jeigu šalies vidurkis yra $0,4 \text{ mSv}$, minėta riba yra per daug griežta – apie 30 % šioje šalyje parduodamų ir naudojamų statybinių medžiagų priimtino radiacinės saugos požįūriu kriterijų neatitiks (Markkanen, 2001). Tai sukeltų daug ekonominių ir socialinių problemų, pažeistų radiacinės saugos optimizavimo principą. Todėl apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės metinės dozės riba tokioje šalyje turėtų būti apie 1 mSv .

Pastarajai šaliai tinkantį kriterijų taikant pirmojoje šalyje, dalis jos gyventojų gautų bereikalingą apšvitą, o tai irgi prieštarautų minėtam optimizavimo principui.

Europos Sąjungos šalyse bet koks šaltinis, išskyrus gamtinės kilmės šaltinius, nuo kurio metinė efektinė apšvitos dozė viršija 1 mSv, turi būti kontroliuojamas (Radiation Protection 112, 1999). Šis 1 mSv kriterijus apšvitai nuo statybinių medžiagų yra taikomas. Didesnės dozės gali būti priimtinos tik išimtiniais atvejais ir atskiruose regionuose. Ši išimtis yra sąlygota to, kad kai kuriose šalyse ar regionuose statybinės medžiagos, kuriose esančių radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė sąlygoja didesnes nei 1 mSv metinės efektinės dozės, naudojamos nuo senų laikų. Bet net ir tada būtina išanalizuoti tokių statybinių medžiagų nešamą naudą ir keliamą žalą.

Tačiau yra galimybių nustatyti ir visoms šalims tinkančius kriterijus. Tai ypatingai svarbu Europos Sąjungoje, kur vyksta laisva prekyba.

Kadangi apšvita nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės veikia be išimties visus žmones, į tam tikras dozes galima nekreipti dėmesio, t. y., jai taikyti nereguliavimo principą, teigiantį, kad praktinė veikla, kurioje naudojami jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniai, gali būti nereguliuojama, jei žala, kurią patiria atskiras žmogus ar tam tikra žmonių grupė, labiausiai veikiama tos praktinės veiklos, neviršija tam tikro lygio (Valiukėnas, 1999). Reikia nustatyti nereguliuojamuosius lygius – radionuklidų savituosius aktyvumus statybinėse medžiagose, kurių neviršijus, šias medžiagas būtų galima naudoti be jokių apribojimų.

Europos Sąjungoje šiuos lygius galima nustatyti tokius, kad jie viršytų pačius griežčiausius kriterijus taikančių šalių reikalavimus. Šie kriterijai, t. y., apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės metinės efektinės dozės galėtų būti nuo kelių dešimtųjų mSv dalių iki 0,5 mSv. (Radiation Protection 112, 1999) rekomenduojama, kad šis kriterijus būtų lygus 0,3 mSv.

Žinoma, tokiu atveju būtų šalių, kurios taikytų ne tokius griežtus reikalavimus, kadangi vienodas ir griežtas vieningo kriterijaus taikymas kai kuriose šalyse gali sukelti problemų statybines medžiagas gaminant, naudojant ir jomis prekiaujant.

Apšvitai įtakos turi ne vienas radionuklidas, todėl ištyrimo lygiai gali būti nustatomi atsižvelgiant į aktyvumo rodiklį, kuris nustatomas tokiu būdu:

$$I = \frac{C_{Ra}}{X} + \frac{C_{Th}}{Y} + \frac{C_K}{Z}, \quad (1.3)$$

čia C_{Ra} , C_{Th} ir C_K – savitieji ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K aktyvumai statybinėse medžiagose, X , Y ir Z – reikšmės, priklausančios nuo pasirinktų apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės kriterijų ir modelio, naudoto nustatant aktyvumo rodiklį.

Ištyrimo lygius viršijus, būtina nustatyti, kokios apšvitos dozės bus dėl to, kad tokios statybinės medžiagos bus naudojamos.

Yra du būdai tai padaryti. Vienas jų yra, kai statybinių medžiagų gamintojas arba tiekėjas atsako už tai, kad apšvitos nuo jo statybinėje medžiagoje esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės neviršys tam tikros dozės ribos – kriterijaus.

Kitas kelias – gamintojai arba tiekėjai pateikia visų statybinių medžiagų specifikacijas – informaciją apie radionuklidų savituosius aktyvumus jose. Pastatų projektuotojai ir statytojai, remdamiesi pateiktomis specifikacijomis, pastatą projektuoja ir stato taip, kad minėti kriterijai nebūtų viršijami. Tačiau šis kelias turi trūkumą – projektuotojai ir statytojai turi mokėti atlikti sudėtingus skaičiavimus. Be to, reikia žinoti visų statybinių medžiagų specifikacijas, o tai gali brangiai kainuoti, nes reikėtų atlikti daug matavimų. Trečia, didelė šių matavimų dalis gali būti visai nereikalinga, nes radionuklidų savitieji aktyvumai medžiagose dažnai neviršytų ištyrimo lygio. Tokiu atveju geriau iš anksto nustatyti, kurios statybinės medžiagos radiacinės saugos požiūriu gali būti svarbesnės, ir kontroliuoti radionuklidų savituosius aktyvumus tik jose.

Kaip minėta, kartais statybinių medžiagų gamybai naudojamos pramonės atliekos. Šiose atliekose gali būti dideli gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai. Tokių statybinių medžiagų priimtumo kriterijai turi nesiskirti nuo kitokių šių atliekų panaudojimo būdų priimtumo radiacinės saugos požiūriu kriterijų. Jeigu statybinėms medžiagoms bus taikomi ne tokie griežti kriterijai, gamintojai stengsis šias atliekas dėti į statybines medžiagas. Jeigu griežti kriterijai bus taikomi vien tik statybinėms medžiagoms, jų gamybai bus naudojamos tik natūralios žaliavos, nors į statybines medžiagas įdėjus nedaug atliekų, radionuklidų savitieji aktyvumai jose beveik nepadidėtų.

Kaip matyti, radionuklidų savitųjų aktyvumų normavimas statybinėse medžiagose yra sudėtingas ir prieštaringas procesas. Todėl reikalavimai radionuklidų savitiesiems aktyvumams statybinėse medžiagose nustatyti tik kai kuriose šalyse.

Europos Komisijos rekomendacijoje (Radiation Protection 112, 1999) siūloma, kad aktyvumo rodiklis būtų apskaičiuojamas pagal formulę:

$$I = \frac{C_{Ra}}{300} + \frac{C_{Th}}{200} + \frac{C_K}{3000}, \quad (1.4)$$

čia C_{Ra} , C_{Th} ir C_K yra ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K savitieji aktyvumai, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Šis aktyvumo rodiklis neturėtų viršyti tam tikrų verčių, kuriuos priklauso nuo to, kaip ir kur statybinė medžiaga naudojama (žr. 1.5 lentelę). Šioje lentelėje nurodytos aktyvumo rodiklio reikšmės, atitinkančios 0,3 mSv ir 1 mSv dozes apribojimus.

1.5 lentelė. Aktyvumo rodiklio ribinių verčių priklausomybė nuo statybinės medžiagos panaudojimo ir ribotosios metinės dozės (Radiation Protection 112, 1999)

Medžiagos	Ribinės aktyvumo rodiklio reikšmės	
	kai ribotoji dozė yra 0,3 mSv	kai ribotoji dozė yra 1 mSv
Medžiagos, kurios pastate naudojama daug (pavyzdžiui, betonas), radionuklidų aktyvumo rodiklis	0,5	1
Paviršiaus apdailai naudojamos medžiagos ir medžiagos, kurios pastate naudojama nedaug (apdailos plytelės, plokštės ir pan.), radionuklidų aktyvumo rodiklis	2	6

Kartu rekomenduojama, kad aktyvumo rodiklis būtų naudojamas kaip parametras, kuriuo remiantis nusprendžiama, kaip naudoti statybinę medžiagą. Jeigu ribinė šio dydžio reikšmė neviršijama, statybinę medžiagą galima naudoti be jokių apribojimų. Tokią medžiagą taip pat turėtų būti galima be jokių apribojimų eksportuoti į bet kurią Europos Sąjungos šalį.

Jeigu ribinė aktyvumo rodiklio reikšmė viršijama, reikėtų nustatyti, kokias dozes žmonės gaus, panaudojus analizuojamą medžiagą. Įvertinant būtina vengti scenarijų, pagal kuriuos žmonės gautų nepagrįstai dideles dozes.

Kontrolės tikslas yra išvengti didelių individualių dozių. Todėl statybinių medžiagų priimtino radiacinės saugos požiūriu kriterijai turėtų būti tokie, kad didžioji šalyje naudojamų statybinių medžiagų dalis juos atitiktų. Radionuklidų savituosius aktyvumus statybinėse medžiagose reikėtų matuoti tik tada, kai kyla įtarimas, jog šie aktyvumai bus tokie, jog priimtino kriterijai bus viršyti. 1.6 lentelėje pateikiama informacija apie tikimybes, kad naudojant vienokią ar kitokią statybinę medžiagą, bus viršijamos 0,3 ir 1 mSv metinės efektinės dozės.

Už priimtino radiacinės saugos požiūriu kriterijų neviršijimą atsako statybinių medžiagų gamintojas arba tiekėjas. Galimi ir kiti šios atsakomybės nustatymo būdai, kurie priklauso nuo šalies teisinės sistemos.

Radionuklidų savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose matavimai turėtų būti atliekami tinkamai kalibruota įranga, kuriai vykdoma kokybės laidavimo programa (Radiation Protection 112, 1999).

Turėtų būti sukurta sistema statybinių medžiagų gamintojams ir prekyautojams informuoti apie statybinių medžiagų priimtino radiacinės saugos požiūriu kriterijus bei būdus šiam priimtinumui nustatyti, tarp jų apie tai, kaip nustatyti apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozes.

Jeigu statybinių medžiagų gamybai naudojamos pramonės atliekos, iškilus įtarimui, jog šiose atliekose gali būti dideli radionuklidų savitieji aktyvumai, turi būti kontroliuojami šie

aktyvumai galutiniuose produktuose. Jeigu reikia, turi būti matuojami ir kitų radionuklidų, ne tik ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K , savitieji aktyvumai.

1.6 lentelė. Statybinės medžiagos, kuriose esančių radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė gali sukelti apšvitą, kurios metinės efektinės dozės gali viršyti 0,3 ir 1 mSv, ir šio viršijimo tikimybės (Radiation Protection 112, 1999)

Statybinė medžiaga	Apšvitos, kai metinė efektinė dozė gali viršyti 0,3 mSv, tikimybė	Apšvitos, kai metinė efektinė dozė gali viršyti 1 mSv, tikimybė
Betonas	Galima – beveik visur, kur naudojami dideli kiekiai	Galima – ten, kur naudojami dideli kiekiai, o jo gamybai buvo panaudotas aukštakrosnių šlakas, pelenai arba smėlis ar uolienos, turinčios didelius gamtinės kilmės radionuklidų savituosius aktyvumus
Aeruotas ir lengvasis betonas	Galima – jei jo gamybai buvo naudotas aukštakrosnių šlakas, pelenai, smėlis ar uolienos, turinčios didelius gamtinės kilmės radionuklidų savituosius aktyvumus	Tikimybė maža – naudojamas tik sienoms
Keraminės plytos	Galima – jei gamybai buvo panaudotas molis su dideliais gamtinės kilmės radionuklidų savitaisiais aktyvumais	Tikimybė maža – naudojamos tik sienoms
Smėlio ir kalkių plytos	Tikimybė maža – maži radionuklidų savitieji aktyvumai, naudojami maži kiekiai (tik sienoms)	Tikimybė maža – maži radionuklidų savitieji aktyvumai, naudojamos tik sienoms
Natūralūs akmenys	Tikimybė maža – naudojami tik paviršių apdailai ir maži kiekiai, kitur galima – kai naudojami dideli kiekiai	Tikimybė maža – naudojami tik paviršių apdailai ir maži kiekiai, kitur galima – naudojami dideli kiekiai
Gipso plokštės arba blokai	Tikimybė maža – jei pagaminti iš natūralaus gipso, galima – jei gaminant naudotas daug ^{226}Ra turintis fosfogipsas	Tikimybė maža – maži radionuklidų savitieji aktyvumai, naudojami tik sienoms

(Ackers, 1984) darbe nurodoma, kad dažnai pakanka nustatyti didžiausią leistiną ^{226}Ra savitąjį aktyvumą statybinėse medžiagose. Šiame darbe pateikiamas modelis, kurį galima panaudoti praktinėje radiacinėje saugoje. Po šio darbo paskelbimo atsirado naujų apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozių skaičiavimo modelių ir tikslesnių šių radionuklidų aktyvumų nustatymo metodų. Nustatant statybinių medžiagų priimtino radiacinės saugos požiūriu kriterijus, būtina atsižvelgti ir į kitus radionuklidus, t. y., ^{232}Th ir ^{40}K .

Suomijoje statybinių medžiagų priimtumas radiacinės saugos požiūriu nustatomas remiantis aktyvumo rodikliais (Markkanen, 1995). Be apribojimų galima naudoti statybines medžiagas, kurių radionuklidų aktyvumo rodiklis nustatytas pagal (1.4) formulę, neviršija 1.

Gatvių ir aikštelių statybai gali būti naudojamos medžiagos, kurių radionuklidų aktyvumo rodiklis, apskaičiuotas pagal (1.5) formulę, neviršija 1:

$$I_2 = \frac{C_{Th}}{500} + \frac{C_{Ra}}{700} + \frac{C_K}{8000} + \frac{C_{Cs}}{2000}, \quad (1.5)$$

čia C_{Th} , C_{Ra} ir C_K , C_{Cs} – savitieji ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K ir ^{137}Cs aktyvumai, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Landšafto formavimui gali būti naudojamos medžiagos, kurių radionuklidų aktyvumo rodiklis, apskaičiuotas pagal (1.6) formulę, neviršija 1:

$$I_3 = \frac{C_{Th}}{1500} + \frac{C_{Ra}}{2000} + \frac{C_K}{20000} + \frac{C_{Cs}}{5000}. \quad (1.6)$$

(1.4) – (1.6) formulėse ^{137}Cs savitasis aktyvumas yra todėl, kad medžiagose, naudojamose gatvių ir aikštelių statybai bei landšafto formavimui, gali būti ir ^{137}Cs . Tikimybė, kad ^{137}Cs savitasis aktyvumas pastatų statybai naudojamose statybinėse medžiagose bus toks, kad jis būtų svarbus radiacinės saugos požiūriu, yra nedidelė. Šių medžiagų žaliavos imamos iš tokio gylgio, į kurį ^{137}Cs , iš atmosferos iškritęs į grunto paviršių, patekti negali.

(Markkanen, 1995) darbe nurodyta, kaip (1.4) – (1.6) formulės išvestos. Remtasi metine ribotąja efektine doze, lygia 1 mSv. Didžiausias leistinas ^{226}Ra savitasis aktyvumas C_{Ra} statybinėse medžiagose nustatytas iš lygties:

$$(0,92 \cdot C_{Ra} - 70) \cdot 10^{-9} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1} \cdot 0,7 \text{ Sv/Gy} \cdot 7000 \text{ h} = 10^{-3} \text{ Sv}. \quad (1.7)$$

(1.7) lygtyje naudotasi dozės koeficientu (koeficientu, nusakančiu ryšį tarp ^{226}Ra savitojo aktyvumo statybinėse medžiagose ir apšvitos nuo šio ^{226}Ra sugertosios dozės arba dozės galios), sugertosios ir efektinės dozių ryšio koeficientu, vidutine sugertosios dozės galios fonine reikšme Suomijoje ir valandų skaičiumi, kurį žmogus vidutiniškai praleidžia patalpose. Minėtų dydžių reikšmės yra šios:

dozės koeficientas – $0,92 \cdot 10^{-9} (\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1})/(\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1})$,

sugertosios ir efektinės dozių ryšio koeficientas – $0,7 \text{ Sv/Gy}$,

vidutinės sugertosios dozės galios foninė reikšmė Suomijoje lauke – $70 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$,

valandų skaičius, kurį žmogus vidutiniškai per metus praleidžia patalpose – 7000 h.

Gauta C_{Ra} reikšmė lygi $270 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$. Patogumui ji suapvalinta iki $300 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Panašiai nustatomi didžiausi leistini ^{232}Th ir ^{40}K savitieji aktyvumai. Naudojami dozės koeficientai yra $((\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1})/(\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}))$: ^{232}Th – 1,02, ^{40}K – 0,00779.

Nustatant didžiausią leistinąjį ^{226}Ra savitąjį aktyvumą medžiagose, naudojamose gatvių ir aikštelių statybai, naudotasi formule:

$$(0,462 \cdot C_{Ra} - 70) \cdot 10^{-9} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1} \cdot 0,7 \text{ Sv} \cdot \text{Gy}^{-1} \cdot 500 \text{ h} = 10^{-4} \text{ Sv} . \quad (1.8)$$

Šiuo atveju metinė ribotoji efektinė dozė lygi 0,1 mSv, dozės koeficientas – $0,46 \cdot 10^{-9} (\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1})/(\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1})$, sugertosios ir efektinės dozių ryšio koeficientas – 0,7 Sv/Gy, vidutinės sugertosios dozės galios foninė reikšmė Suomijoje lauke – $70 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$, valandų skaičius, kurį žmogus vidutiniškai per metus praleidžia gatvėse ir aikštelėse – 500 h. Gautas didžiausias leistinasis ^{226}Ra savitasis aktyvumas lygus $773 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, suapvalinus – $800 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Nustatant didžiausią leistiną ^{226}Ra aktyvumą medžiagoje, naudojamose landšafto formavimui, naudotasi lygtimi:

$$(0,462 \cdot C_{Ra} - 70) \cdot 10^{-9} \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1} \cdot 0,7 \text{ Sv} \cdot \text{Gy}^{-1} \cdot 150 \text{ h} = 10^{-4} \text{ Sv} . \quad (1.9)$$

Laikoma, kad vietose, kur tokios medžiagos buvo panaudotos landšafto formavimui, žmogus per metus praleidžia 150 valandų. Gautas didžiausias leistinas ^{226}Ra savitasis aktyvumas lygus $2222 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, suapvalinus – $2000 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Nustatant didžiausius leistinus ^{137}Cs savituosius aktyvumus, vidutinės sugertosios dozės galios foninės reikšmės Suomijoje lauke neatimamos.

Taip nustatant didžiausius leistinus ^{226}Ra savituosius aktyvumus, neatsižvelgiama į apšvitos nuo ^{222}Rn , išsiskyrusio iš statybinių medžiagų, dozes.

Austrijoje 1996 metais, po 4 metų ekspertų grupės darbo, buvo priimtas standartas, kuriame nurodoma, kaip apriboti žmonių apšvitą nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės (Steger, 1992). Statybinė medžiaga radiacinės saugos požiūriu laikoma priimtina, jeigu efektinė apšvitos nuo joje esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozė per metus neviršija 2,5 mSv. Nustatant šią dozę, atsižvelgiama ir į ^{222}Rn , išsiskiriantį iš medžiagos. Nustatyta ir didžiausia leistina išorinės apšvitos nuo urano turinčia glazūra padengtų plytelių beta spinduliuotės dozės galia, lygi $3,4 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$. Toks dozės galios lygis nustatytas remiantis tuo, kad metinė dozė turi neviršyti 10 mSv, bei tuo, kad žmogus šalia tokių plytelių paviršių per parą gali praleisti 8 valandas. Apskaičiuota, kad tokia dozės galia būtų, jeigu plytelėse būtų $1 \text{ Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$ urano radioaktyviojoje pusiausvyroje su savo skilimo produktais.

Minėtas efektinės dozės lygis (2,5 mSv per metus dėl išorinės apšvitos dėl statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės) bus neviršytas, jeigu galios nelygybė:

$$\frac{a_{40K}}{10000} + \frac{a_{226Ra}}{1000} + \frac{a_{232Th}}{670} \leq 1, \quad (1.10)$$

čia a_{40K} , a_{226Ra} ir a_{232Th} – ^{40}K , ^{226}Ra ir ^{232}Th savitieji aktyvumai, $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Nustatant, kokia bus apšvitos nuo radono, išsiskiriančio iš statybinių medžiagų, dozė, remtasi lygtimi:

$$c_{222Rn} = a_{226Ra} \cdot \frac{O}{V} \cdot \frac{\lambda \cdot \varepsilon}{\nu} \cdot \frac{\rho \cdot d}{2}, \quad (1.11)$$

čia c_{222Rn} – radono tūrinis aktyvumas, a_{226Ra} – radžio savitasis aktyvumas, O/V – patalpos vidinių paviršių ploto ir jos tūrio santykis, λ – radono skilimo konstanta, ε – radono ekshaliacijos koeficientas, ν – patalpos vėdinimo greitis (laikoma, kad lygus 0,7 patalpos tūrio per valandą), ρ – statybinių medžiagų tankis, d – konstrukcijų (sienų, grindų ir pan.) storis.

Jeigu patalpos vidinių paviršių ploto ir jos tūrio santykis lygus 2 m^{-1} (šie santykiai yra nuo $1,5 \text{ m}^{-1}$ iki $2,5 \text{ m}^{-1}$), o patalpos vėdinimo greitis – 0,7 patalpos tūrio per valandą, gaunama:

$$c_{222Rn} = a_{226Ra} \cdot \frac{\lambda \cdot \varepsilon \cdot \rho}{\nu} \cdot d. \quad (1.12)$$

Patalpoje esant $1 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ radono, joje esantis žmogus per metus gaus $35 \mu\text{Sv}$ (ICRP 50, 1987). Iš statybinių medžiagų atsiradusio radono patalpoje bus ne daugiau kaip $70 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ir patalpoje esantys žmonės per metus gaus efektinę dozę, neviršijančią $2,5 \text{ mSv}$, jei bus tenkinama nelygybė:

$$\frac{a_{226Ra}}{70} (0,0108 \cdot \varepsilon \cdot \rho \cdot d) \leq 1. \quad (1.13)$$

Bendra efektinė vidinės ir išorinės apšvitos dozė per metus neviršys $2,5 \text{ mSv}$ tuo atveju, kai galios nelygybė:

$$\frac{a_{40K}}{10000} + \frac{a_{226Ra}}{1000} \cdot (1 + 0,15 \cdot \varepsilon \cdot \rho \cdot d) + \frac{a_{232Th}}{600} \leq 1. \quad (1.14)$$

Trupmenoje, apibūdinančioje narį, susijusį su ^{232}Th , koeficientas 670 pakeistas į 600, atsižvelgiant į tai, jog ^{232}Th įtaka apšvitai yra nedidelė. Jeigu nėra radioaktyviosios pusiausvyros tarp ^{232}Th ir jo skilimo produktų, apskaičiuojant jo aktyvumą, naudojamosi formulė:

$$a_{232Th} = \frac{a_{228Ra} + a_{228Th}}{2}. \quad (1.15)$$

Minėtame standarte (Steger, 1992) nurodoma, kad turi būti atliekami statybinių medžiagų trijų tipų bandymai, kuriais nustatomas šių medžiagų tinkamumas radiacinės saugos požiūriu.

Jeigu (1.14) nelygė galioja, laikoma, kad statybinė medžiaga arba statybinis gaminys atitinka standarto (Steger, 1992) reikalavimus.

(Steger, 1992) darbe aprašyta sistema yra sudėtinga. Tačiau ši sistema leidžia įvertinti tikrąsias apšvitos – tiek išorinės, tiek vidinės – sukeltos statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės, sąlygas. Ji yra pavyzdys, kaip galima įvertinti statybines medžiagas radiacinės saugos požiūriu.

Vokietijoje nustatyti reikalavimai medžiagoms, kurių nebereikia kontroliuoti radiacinės saugos požiūriu (Schaller, 2002). Ypatingas dėmesys čia skiriamas statybinių atliekų ir grunto nebekontroliavimui. Reikalavimai taikomi dėl žmogaus veiklos užterštomis statybinėms medžiagoms, tačiau panašūs nebekontroliavimo nustatymo principai gali būti taikomi ir gamtinės kilmės radionuklidų turinčioms statybinėms medžiagoms. Panašiai turėtų būti kontroliuojamos apšvitos nuo dirbtinės kilmės radionuklidų, kuriais užterštos statybinės medžiagos, jonizuojančiosios spinduliuotės dozės. Siekiant palengvinti reikalavimų taikymą, remiamasi įvairiais apšvitos scenarijais ir skaičiavimų koeficientais.

Nustatant aktyvumo rodiklį dėl išorinės apšvitos, Vokietijoje naudotasi panašia į (NCRP Nr. 103, 1989) darbe pateikta metodika. Kadangi šiuo atveju metinė ribotoji dozė yra didesnė, aktyvumo rodikliui keliami reikalavimai yra ne tokie griežti – statybines medžiagas naudoti galima tada, kai aktyvumo rodiklis pagal formulę (1.10) neviršija 1.

Siekiant nustatyti apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės apribojimus, darbe (Pinnock, 1999) buvo remiamasi ryšiu tarp dozės galios ir gamtinės kilmės radionuklidų savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose. Taip buvo nustatyti didžiausi leistinieji ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose. Be to, buvo atsižvelgta į tai, kokia vidinė apšvita gali būti dėl ^{222}Rn , kuris, iš kitos pusės, laikytas vieninteliu vidinės apšvitos šaltiniu. Jeigu apskaičiavus ribinius aktyvumus, būtų gautas rezultatas, lygus y , gyvenamuosiuose namuose būtų galima naudoti medžiagas, kurių $y < 1$. Pramonėje būtų galima naudoti medžiagas, kurių y tenkina sąlygą – $1 < y < 2$, kelių statybai – $2 < y < 6$, negyvenamųjų pastatų pamatams – $6 < y < 10$. Jeigu $y > 10$, tokios medžiagos neturėtų būti naudojamos niekur.

Siūlomas metodas panašus į aprašytus aukščiau, kadangi ir šiuo, ir kitais atvejais atsižvelgiama į apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozes, o šias dozes, savo ruožtu, lemia ir tai, kaip šios medžiagos bus naudojamos.

Kinijoje natūralūs akmenys kaip statybinė medžiaga privalo būti ištirti ir įvertinti radiacinės saugos požiūriu pagal gaminių iš akmens standartą. Atliekant akmenų klodų ir produktų iš akmens tyrimus gali būti naudojami gama spektrometrinis ir gama spinduliuotės intensyvumo matavimo metodai. Didžiausia leistinoji apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės galia yra $5,2 \text{ nC}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$. Produkcija iš akmens skirstoma į tris grupes (A, B, C). C grupės akmenų produktų Ra lygiavertis aktyvumas viršija $1000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Jie negali būti naudojami kaip dekoratyvinės medžiagos namų vidaus apdailai (Nanping, 1998).

Toje pačioje šalyje nustatyta, kad aktyvumo rodiklis

$$I = \frac{C_{Ra}}{370} + \frac{C_{Th}}{260} + \frac{C_K}{4200} \quad (1.16)$$

turi neviršyti 1,3, o aktyvumo rodiklis $C_{Ra}/200 - 1$. Pirmasis rodiklis naudojamas apriboti išorinei apšvitai nuo gamtinių radionuklidų, kurių savitieji aktyvumai naudojami skaičiuojant aktyvumo rodiklį, jonizuojančiosios spinduliuotės, antrasis – apriboti vidinei apšvitai nuo radono skilimo produktų (Yahong, 2004).

(Shukla, 1995) darbe nustatyta, kad jeigu ^{226}Ra savitasis aktyvumas statybinėse medžiagose neviršija $85 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ir radžio indeksas bus mažesnis už $370 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, apšvita nuo tokiose medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės bus tokia, kad medžiagas galima naudoti be apribojimų.

Izraelyje reikalaujama, kad apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės metinė efektinė dozė neviršytų $0,45 \text{ mSv}$ (Kovler, 2004).

Atliekami tyrimai, kuriais siekiama nustatyti, ar statybinės medžiagos atitinka vienoje ar kitoje šalyje nustatytus jų priimtumo kriterijus. Šių darbų tikslas yra ne tik statybinių medžiagų įvertinimas radiacinės saugos požiūriu, bet ir pačių kriterijų įvertinimas jų tinkamumo ir optimalumo požiūriu.

(Yahong, 2002) darbe aprašomi tyrimai, kurių tikslas buvo nustatyti, ar tiriamosios statybinės medžiagos atitinka Kinijoje naudojamus priimtumo radiacinės saugos požiūriu kriterijus. Tirtos spalvota glazūra padengtos plytelės, naudojamos vidinei apdailai. Naudojant gama spektrometriją, buvo nustatyti radionuklidų savitieji aktyvumai įvairiuose gaminiuose, žaliavose ir tarpiniuose gamybos produktuose. Naudojantis aktyvuota anglimi, buvo atlikti radono ekshalicijos greičio matavimai. Keraminių plytelių paviršiuje alfa ir beta spinduliuotės intensyvumai buvo išmatuoti alfa ir beta radioaktyviosios taršos matuokliais. Iš rezultatų matyti, kad labai skiriasi glazūros ir glazūrotų plytelių jonizuojančiosios spinduliuotės intensyvumai. Kai kurių gamtinių radionuklidų savitieji aktyvumai viršijo nereguliuojamosios veiklos lygius,

nustatytus TATENA pagrindiniuose saugos standartuose. Nustatyta, kad ^{226}Ra savitasis aktyvumas šiose plytelėse turėtų neviršyti $1000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Be to, turėtų būti tenkinama nelygybė

$$\frac{C_{Ra}}{310} + \frac{C_{Th}}{230} + \frac{C_K}{3500} \leq 1. \quad (1.17)$$

Matyti, kad taikomi įvairūs statybinių medžiagų įvertinimo radiacinės saugos požiūriu būdai. Visi šie būdai panašūs tuo, kad remiamasi apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozėmis ir šių dozių priimtumu, o skiriasi sudėtingumu. Būdai darosi vis sudėtingesni. Taip stengiamasi užtikrinti kuo didesnę vertinimo lankstumą ir objektyvumą.

1.3.2. Apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozių įvertinimo būdai

Kaip minėta, statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė sukelia dviejų tipų apšvitą – išorinę ir vidinę. Išorinė apšvita yra dėl statybinėse medžiagose esančių gamtinės kilmės radionuklidų, spinduliuojančių skvarbiają (gama ir rentgeno) spinduliuotę. Ši spinduliuotė prasiskverbia pro statybinių medžiagų ir oro sluoksnius, skiriančius jos šaltinį nuo žmogaus. Vidinė apšvita yra nuo radono, kuris susidaro skylant statybinėse medžiagose esančiam ^{226}Ra ir iš jų išsiskiria, skilimo produktų jonizuojančiosios spinduliuotės.

Tiek vienos, tiek kitos apšvitos dozių vertinimas yra sudėtingas. Išorinės apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės priklauso ne tik nuo radionuklidų savitųjų aktyvumų jose, bet ir nuo medžiagų tankio ir kiekio, patalpos geometrijos, vėdinimo intensyvumo. Vidinės apšvitos dozių vertinimą komplikuoja radono išsiskyrimo iš statybinių medžiagų parametrai, pavyzdžiui, ekshaliacijos greičio neapibrėžtys.

Todėl įvertinant apšvitos dėl radono ir jo skilimo produktų dozes, didelę reikšmę turi radono išsiskyrimo iš statybinių medžiagų modeliavimas. Tai daryti galima aprašant kiekvieno susidariusio radono atomo judėjimą, kuriam didelę reikšmę turi ^{226}Ra atomo skilimo metu įgyta kinetinė energija.

Tačiau sekti kiekvieno radono atomo judėjimą ir eksperimentiškai nustatyti poringos medžiagos paviršiaus plotą, kuris turi didelę reikšmę radono atomų patekimui į medžiagos paviršių, nėra praktiška (Sun, 1995), todėl šiame darbe pateikiami rezultatai, gauti modeliuojant. Naudotasi Monte Karlo metodu.

Radono ekshaliacijai iš medžiagų aprašyti gali būti naudojami sudėtingi ir detalūs mikroskopiniai modeliai. Toks sudėtingumas ir detalumas turi ir neigiamą pusę – tada didelę reikšmę turi prielaidos ir parametrai, naudojami skaičiuojant, todėl klaidingai pasirinkus kokią

nors prielaidą ar parametą, galima gauti neteisingą rezultatą. Tačiau tokie modeliai yra universalūs, tad gali būti naudojami ir kitų radioaktyviųjų dujų, pavyzdžiui ^{222}Rn ekshalacijai aprašyti.

Todėl daug svarbesnis tokio dozių vertinimo etapas yra apšvitos nuo išsiskyrusio ^{222}Rn skilimo produktų dozių skaičiavimas. Šios dozės skaičiuojamos remiantis žmogaus kvėpavimo trakto modeliu (ICRP 66, 1994). Įvertinant dozes, galima naudotis ir dozės koeficientu, nustatančiu ryšį tarp radono tūrinio aktyvumo patalpose ir efektinės dozės (ICRP 65, 1993). Pastarajame šaltinyje pateikiamas dozės koeficientas yra nustatytas esant tipiniam radono ir jo skilimo produktų pusiausvyros koeficientui ir tipinei trukmei, kada žmogus būna patalpose. Tai, kaip šie parametrai nustatomi, kelia dar daug klausimų. Tačiau apšvitos nuo radono spinduliuotės dozės įvertinimas niekuo nesiskiria nuo atvejų, kai radono šaltiniai yra ne statybinės medžiagos, o gruntas.

Tokio įvertinimo pavyzdys gali būti (Shaikh, 2003) darbas, kur aprašoma kaip buvo apskaičiuotos metinės efektinės dozės, kurias gauna daugiaaukščio namo gyventojai dėl radono ir jo skilimo produktų spinduliuotės. Pirmajame aukšte jos yra 1,03 mSv, devynioliktajame – 0,38 mSv. Viršutiniame aukšte beveik visas radonas yra iš statybinių medžiagų. Išmatuotos reikšmės labai gerai sutapo su apskaičiuotosiomis.

Kur kas daugiau problemų iškyla vertinant išorinės apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozes. Skaičiuojant šias dozes, svarbiausia atsižvelgti į ^{226}Ra , ^{232}Th , jų skilimo produktų ir ^{40}K spinduliuotę. ^{226}Ra yra labai svarbus ir dėl to, kad jam skylant išsiskiria ^{222}Rn . Skaičiuojant išorinės apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozes, sudėtinga įvertinti šių radionuklidų skvarbiosios spinduliuotės sugėrimą pačiose medžiagose. Nors sluoksnis, kurį spinduliuotė turi praeiti, nėra didelis (tuo šis vertinimas skiriasi nuo apšvitos dėl grunte esančių radionuklidų jonizuojančios spinduliuotės dozių vertinimo), spinduliuotės sugėrimas statybinėse medžiagose yra ypatingai svarbus, kai šios spinduliuotės energija yra maža.

(Petrooulos, 2002) darbe aprašoma metodika, kuria galima įvertinti, kaip statybinės medžiagos sugeria mažų energijų gama kvantus. Tam naudojamas ilginis gama spinduliuotės silpninimo koeficientas μ . Darbe nustatyta, kaip šis koeficientas priklauso nuo medžiagos tankio ir gama kvantų energijos.

Pačioms dozėms skaičiuoti neretai naudojamas Monte Carlo metodas. Štai (Clouvas, 2000) darbe aprašoma, kaip dozių įvertinimui šiuo metodu buvo skaičiuojamas koeficientas B , kuris apibūdina apšvitos nuo ne taškinio šaltinio dozę (angl. *buildup factor*) išsklaidytajai spinduliuotei patalpose. Pagrindinė išvada yra tai, kad šis koeficientas beveik nepriklauso nuo patalpos matmenų, sienų storio, statybinių medžiagų tankio ir gama spinduliuotės šaltinio

geometrijos. Apskaičiuotas koeficientas B buvo naudojamas nustatant ore sugertosios dozės galios reikšmes iš atvirame lauke (angl. *in situ*) atliktų gama spektrometrinių matavimų Salonikuose, Graikijoje.

Gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai, išmatuoti boksitų atliekose, naudojamose kaip vietinė statybų žaliava, ir grunte buvo naudojami modeliuojant efektinės dozės galios padidėjimą standartinio dydžio tipinio namo viduryje. Apskaičiuotos ir išmatuotos reikšmės gana gerai sutampa (Pinnock, 1991).

Apšvitos dėl statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozėms skaičiuoti naudojamos ir standartinės programos, kuriomis skaičiuojamos apšvitos ir nuo kitų šaltinių dozės. (Oner, 2001) aprašoma, kaip GENII apšvitos dozės skaičiavimo kompiuterine programa buvo skaičiuojama metinė išorinės apšvitos nuo ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K , esančių įprastose statybinėse medžiagose ir akmens anglimi kūrenamų elektrinių atliekose, naudojamose statybinių medžiagų gamybai Indijoje, dozė. Nustatyta, kad didžiausią apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozę žmogus gauna nuo ^{40}K – $1,0 \cdot 10^{-6}$ Sv, o mažiausią – nuo ^{232}Th – $2,3 \cdot 10^{-11}$ Sv. Palyginimui apskaičiuota apšvitos nuo grunte esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozė buvo $(6,3 \pm 2) \cdot 10^{-7}$ Sv. Nustatyti duomenys yra priimtini palyginus su apšvitos nuo radionuklidų, esančių statybinėse medžiagose OECD šalyse, jonizuojančiosios spinduliuotės dozėmis.

(Shukla, 1995) darbe nurodoma, kad išorinės apšvitos nuo gama spinduliuotės dozės galia pastato viduje buvo modeliuojama naudojant kompiuterinę programą QAD-CGGP. Nustatyta, kad grindų ir lubų įnašas sudaro po 35 % dozės, kurią žmonės gauna patalpose, sienų – 15 %. Taip pat nustatyta, kad Indijoje apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės galios reikšmės patalpose, esančiuose skirtinguose pastatuose, tarpusavyje gali skirtis dviem eilėmis.

Modeliai, naudoti įvertinant išorinės apšvitos dozes, kurias gyventojai gavo dėl ^{60}Co statybinėse medžiagose, aprašyti (Candarrelli, 1997).

Šie pavyzdžiai rodo, kad yra programos, kuriomis naudojantis galima įvertinti apšvitos tiek nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės, tiek nuo radono patalpose dozes. Nors yra daug neaiškumų dėl šių programų tikslumo ir patikimumo, jos naudojamos apšvitos nuo šių šaltinių dozėms įvertinti. Pagrindinis būdas tikslumui patikrinti yra skaičiavimų rezultatus lyginti su eksperimentiniais duomenimis. Šios programos yra skirtos apšvitos nuo įvairių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozėms apskaičiuoti ir yra pritaikomos apšvitai nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės įvertinti.

Paskutinis apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės tyrinėjimo etapas yra priemonių, kurių reikia imtis siekiant sumažinti šią apšvitą, identifikavimas.

Nors apšvitą nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės mažinti yra sudėtinga, o jos mažinimo būdų pasirinkimas yra gerokai mažesnis, negu būdų, kuriais mažinamas radono tūrinis aktyvumas patalpose pasirinkimo, yra rekomendacijų, kaip tai daryti.

Radono emanacijos iš statybinių medžiagų greitį galima sumažinti jų paviršių padengus dažais ar kitokiais apdailos sluoksniais. Svarbu ne tiek surasti gerai izoliuojančią medžiagą, kiek tinkamai ją padengti paviršių, iš kurio radonas išsiskiria. Pavyzdžiui, ant grindų uždėjus vinilo plyteles, radono emanacijos greitis žymiai sumažės tik tada, kai jos bus priklijuotos prie grindų paviršiaus. Jeigu ant tokio pat paviršiaus vinilo grindų danga bus tik uždėta, bet nepriklijuota, radonas į patalpą pateks oro plyšiu tarp grindų ir jų dangos.

Radono tūrinis aktyvumas prie paviršiaus dangos iš statybinės medžiagos pusės būna didesnis, todėl didelę reikšmę radono patekimo į patalpas greičiui turi plyšiai ir angos dangoje bei plyšiai, kuriais radonas gali apeiti dangą. Danga, apsauganti nuo radono, turi būti be plyšių ar skylių, gerai priklijuota prie paviršiaus, iš kurio radonas išsiskiria, ir didesnė už paviršių, kurį ji dengia (NCRP Nr. 103, 1989).

Kitas būdas sumažinti statybinių medžiagų įtaką radono tūriniam aktyvumui yra naudoti medžiagas, kuriose nėra didelių ^{226}Ra savitųjų aktyvumų. Tam pirmiausia reikia nustatyti, kokiose medžiagose šio radionuklido gali būti daugiau. Tačiau tai gali būti sudėtinga, kadangi dažnai betono gamyklos žaliavas gauna įvairiuose karjeruose, kurių gali būti daug. Pavyzdžiui, JAV tokių gamyklų ir karjerų yra tūkstančiai, tad ir kontroliuoti juos visus yra labai sudėtinga.

Norint sumažinti iš statybinių medžiagų į patalpas patenkančio radono kiekį, galima keisti ir pastato konstrukciją, mažinant jame mineralinės kilmės statybinių medžiagų kiekį. Pavyzdžiui, JAV namų statybai naudojamos konstrukcijos, pagamintos iš medžio ir plieno (NCRP Nr. 103, 1989).

Kai radonas išsiskiria iš statybinių medžiagų, paprasčiausias jo tūrinių aktyvumo mažinimo būdas yra padidinti vėdinimo greitį. Kitos radono tūrinio aktyvumo mažinimo priemonės yra šios:

- dideliu aktyvumu pasižyminčių statybinių medžiagų paviršiaus padengimas radonui nepralaidžiu sluoksniu,
- oro plyšių virš paviršiaus įrengimas ir šių plyšių vėdinimas,

- statybinių medžiagų, kuriose yra nepriimtinais dideli radionuklidų savitieji aktyvumai, pakeitimas medžiagomis su mažesniais radionuklidų savitaisiais aktyvumais (Clavensjo, 1999).

Vienintelis išorinės apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės sumažinimo būdas yra šių medžiagų pakeitimas kitomis, turinčiomis mažesnius radionuklidų savituosius aktyvumus (Clavensjo, 1999).

1.4. Matavimo metodų apžvalga

Metodai, kuriais tiriama radionuklidų, esančių statybinėse medžiagose jonizuojančiosios spinduliuotės įtaka apšvitai, yra įvairūs. Jie priklauso nuo tiriamojo objekto, reikalingo matavimo jautrio, radionuklidų, kurių aktyvumai matuojami, registruojamų parametrų.

Šiuos metodus galima suskirstyti į grupes:

- radionuklidų savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose tyrimo metodai,
- radono tūrinių aktyvumų patalpose tyrimo metodai,
- apšvitos nuo statybinių medžiagų radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozių matavimo metodai.

Statybinėse medžiagose esančių radionuklidų savitieji aktyvumai matuojami gama spektrometriniu metodu, kadangi šie radionuklidai arba jų skilimo grandinių nariai yra gama spinduliai (Steger, 1999), (Lee, 2004). Didelės skiriamosios gebos Ge spektrometrais galima atskirti netgi arti viena nuo kitos esančias skirtingų radionuklidų smailes, nors kai kur gama spindulių savitiesiems aktyvumams statybinėse medžiagose matuoti naudojami ir kur kas mažesnės skiriamosios gebos NaI(Tl) spektrometrai (El-Hussein, 2005). Tokiu atveju naudojama programinė įranga, kuri sudėtingą gama spektrą išskaido į paprastesnius spektrus, charakteringus atskiriems statybinėse medžiagose esantiems radionuklidams.

Tačiau ir Ge spektrometruose kai kuriais atvejais tenka naudoti sudėtingesnius analizės algoritmus. Vienas tokių atvejų aprašytas (Lavi, 2004) darbe. Tai atvejis, kai buvo atliekami radionuklidų savitųjų aktyvumų matavimai bandiniuose, kuriuose yra palyginti daug ^{228}Ac – ^{232}Th skilimo grandinės nario, kurio 1459,2 keV smailė yra šalia ^{40}K 1460,8 keV smailės. Tačiau net ir tada daugeliu atveju neapibrėžtis, atsirandanti nustatant ^{40}K savitąjį aktyvumą, neviršija 1 %, nors galimos ir didesnės neapibrėžtys.

Statybinių medžiagų gama spektrometrijoje yra sudėtinga parinkti, kurias smailes naudoti radionuklidų aktyvumams bandiniuose skaičiuoti. Nors gamtiniai radionuklidai spinduliuoja daug energijų gama kvantų, reikia išrinkti optimalias energijas. Kai kurios smailės yra labai arti kitų smailių, todėl sumažėja analizės tikslumas. Radionuklidų aktyvumui nustatyti naudojant radionuklidų, kurie skilimo grandinėse yra po dujinių šių grandinių narių, sąlygotas smailes,

bandinyje gali nebūti radioaktyviosios pusiausvyros, t. y., po skilimo grandinių dujinių narių esančių radionuklidų aktyvumai bandinyje bus mažesni negu prieš dujinius narius esančių radionuklidų, nes dalis dujinio radionuklido, susidariusio bandinyje, iš bandinio išsiskirs. Be to, radionuklidai gali praeiti pro matavimo indo medžiagą ar pro plyšius prie jo dangčio.

(Chen, 1993) darbe aprašoma, kaip ^{238}U ir ^{232}Th skilimo grandinių narių aktyvumai buvo nustatomi pagal ^{214}Bi smailę, kurios energija 609 keV, ir ^{212}Pb 238 keV smailę. ^{40}K aktyvumui nustatyti buvo naudojama jo 1460 keV energijos smailė. Kadangi susmulkinus monolitinius statybinių medžiagų bandinius, iš jų gali išsiskirti didelis ^{222}Rn kiekis ir todėl būtų pažeista radioaktyvioji pusiausvyra, buvo analizuota, kaip daugėja ^{222}Rn hermetiškai uždarytame bandinyje.

Tipiškas gamtinės kilmės radionuklidų savitųjų aktyvumų matavimo metodas aprašomas (Tzortzis, 2003) darbe. Šie aktyvumai įvairiose uolienose (granituose), įvežamuose į Kiprą, buvo tirti didelės skiriamosios gebos gama spektrometru. Bandiniai buvo smulkinami, uždaromi į plastikines Marinelli geometrijos kiuvetes ir analizuojami nuo 10 iki 14 valandų. Kitas toks pavyzdys yra pateiktas (Khan, 2001) darbe. Jame aprašoma, kaip gama radionuklidų savitieji aktyvumai portlandcemenčio ir jo sudedamųjų dalių bandiniuose Pakistane buvo tirti gama spektrometriškai. Tam buvo naudojamas gryno germanio detektorius. (Shi Weiya, 2001) darbe aprašomi radionuklidų savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose tyrimai, atlikti irgi gama spektrometriniu metodu. Svarbu tai, jog spektrai buvo analizuojami naudojantis mažiausių jų kvadratų metodu.

Galima matuoti ir dozę arba dozės galią, nors šiuo atveju sudėtinga, o paprastai ir neįmanoma, nustatyti, kokią įtaką matuojamam parametrai turi statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė. (Sivakumar, 2002) darbe aprašoma, kaip tokiems matavimams Indijoje, Gudalore buvo naudojami CaSO_4 termoluminescenciniai dozimetrai.

(Bochicchio, 2004) aprašomas metodas, kai dozės galia patalpose įvertinama remiantis matavimų, atliktų pastato išorėje prie pat jo sienos, rezultatais. Apdorojant matavimų rezultatus, atsižvelgiama į pastato geometrines ir konstrukcines ypatybes.

(Yahong, 2004) darbe aprašoma, kaip Kinijoje buvo analizuojamos statybinės medžiagos. Pirmasis apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozių tyrimo etapas buvo dozės galios matavimai. Matavimai buvo atliekami portatyviniais gama spinduliuotės dozės galios matuokliais 0,1 m atstumu nuo tiriamųjų statybinių medžiagų krūvos, kurios matmenys buvo $(2 \times 2 \times 0,5) \text{ m}^3$, centro. Nustatyta, kad kai krūva kitokio dydžio arba matavimai atliekami ne ties krūvos centru, matavimų rezultatai skiriasi žymiai. Tai rodo, kokią didelę reikšmę turi matavimo geometrija, t. y., matavimo prietaiso ir tiriamojo objekto išsidėstymas vienas kito atžvilgiu. Toks matavimas, nors ir paprastas, yra

netikslus, kadangi dozės galiai didelę reikšmę turi kosminė spinduliuotė bei gama spinduliuotė, kurią skleidžia šalia esančių objektų, pavyzdžiui, grunto radionuklidai.

Norint nustatyti gamtinės kilmės radionuklidų savituosius aktyvumus statybinėse medžiagose, jų bandinius būtina smulkinti, todėl buvo nuspręsta pasirinkti alternatyvų metodą – alfa ir beta aktyvumų matavimus prie statybinių medžiagų paviršiaus. Remtasi tuo, kad santykis tarp alfa ir beta aktyvumų bei gama aktyvumo kiekvienam radionuklidui yra žinomas ir priklauso tik nuo to radionuklido savybių. Atsižvelgta ir į tai, jog dažniausiai gamtinės kilmės radionuklidai statybinėse medžiagose pasiskirstę tolygiai.

Alfa ir beta aktyvumų matavimai buvo atliekami, ant statybinės medžiagos bandinio paviršiaus uždėjus alfa ir beta spinduliuotėms jautrų detektorių iš fosforo. Prieš tai buvo atliekami foninės spinduliuotės intensyvumo matavimai. Kiekvieno matavimo trukmė buvo 3 minutės. Matavimų rezultatai buvo palyginti su gama spektrometrinių matavimų rezultatais.

Nustatyta, jog glazūruotose plytelėse, kurių paviršius padengiamas cirkonio smėliu $ZrSiO_4$, didžioji gamtinės kilmės radionuklidų dalis yra ploname glazūros sluoksnyje. Dėl šios priežasties aprašytas metodas negali būti panaudotas glazūruotų plytelių tyrimams – radionuklidai plytelėse pasiskirstę netolygiai.

Gamtinių radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose gali būti matuojami ir tiesiogiai, naudojant *in situ* gama spektrometrą. Toks matavimo būdas aprašomas (Clouvas, 2001).

Urano ir torio aktyvumams matuoti statybinėse medžiagose naudota ir neutronų aktyvacinė analizė (Zaidi, 1999). Gerų rezultatų pasiekta, šią metodiką naudojant kartu su gama spektrometrija.

Kartais atliekami ir kompleksiniai tyrimai. (Misdaq, 2002) darbe aprašoma kaip matuoti torio savitieji aktyvumai įvairiose statybinėse medžiagose ir įvertinti torono bei jo skilimo produktų aktyvumai namuose, pastatytuose iš šių statybinių medžiagų. Tam taikyti trys nauji metodai, kuriuose naudojami CR-39 ir LR115 II tipo kietojo kūno alfa trekų detektoriai. Pirmasis metodas remiasi tuo, kad alfa dalelės spinduliuoja urano ir torio skilimo grandinės radionuklidai statybinėse medžiagose arba radonas bei toronas ar jų skilimo produktai, esantys patalpų ore. Alfa dalelės registruojamos alfa trekų detektoriais. Apie radionuklidų aktyvumus sprendžiama pagal alfa trekų tankį. Antruoju metodu įvertinamas CR-39 ir LR115 ėsdinimo kritinis kampas ir matuojami trekų tankiai. Trečiuoju metodu yra skaičiuojamas alfa dalelių, išspinduliuotų urano ir torio skilimo grandinių radionuklidų, ar radono ir torono grupių narių ore, registravimo CR-39 ir LR-115 efektyvumas, matuojant trekų tankius, užregistruotus šiais detektoriais.

Radono, kuris išsiskiria iš anglies ir šlako, tūrinių aktyvumų matavimams buvo naudoti alfa spinduliuotei jautrūs LR-115 II tipo plastikiniai trekų detektoriai (Kant, 2001).

(Dwivedi, 2001) darbe radono, torono ir jų skilimo produktų turiniai aktyvumai kelių miestų namuose šiaurės rytų Indijoje buvo matuojami naudojant pasyvų laike integruojantį monitorių, kuris sudarytas iš dvigubos kameros su LR-115 detektoriais.

Radono turiniai aktyvumai gali būti matuojami CR-39 plastikiniais trekų detektoriais (Chauhan, R. P.; Kant, K., 2001), aktyvuotos anglies ir elektretų kameromis (Clavensjo, 1999), jonizacinėmis (Lucas) kameromis (Abbady, 2004).

Kaip matyti, apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės tirti naudojami įvairūs metodai. Visi jie tarpusavyje skiriasi savo sudėtingumu. Paprasčiausi yra tie, kuriems nereikia arba beveik nereikia apdoroti bandinius, o rezultatai gaunami tiesioginiais dozės, dozės galios ar paviršiaus taršos matavimais. Tačiau tokių metodų tikslumas nėra didelis, o iš jų rezultatų gaunama ribota informacija. Sudėtingi matavimo metodai, pavyzdžiui radono ekshalicijos iš statybinių medžiagų tyrimai naudojant hermetišką kamerą, duoda tikslią informaciją. Tačiau ši informacija yra specifinė.

Gama spektrometrija yra tikslus ir pakankamai paprastas metodas, duodantis informaciją apie gamtinės kilmės radionuklidų savituosius aktyvumus statybinėse medžiagose. Ši informacija reikalinga ne tik statybinių medžiagų tinkamumui radiacinės saugos požiūriu įvertinti, bet ir apšvitos nuo jose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozei apskaičiuoti. Svarbu tai, jog naudojantis gama spektrometriniu metodu, galima įvertinti atskirų radionuklidų įnašą į apšvitos dozę. Pagrindiniai gama spektrometrijos trūkumai yra tokie: reikia sudėtingos įrangos, o matavimo procedūra yra techniškai sudėtinga, ir kad reikia matavimui ruošti bandinius.

1.5. Radionuklidų statybinėse medžiagose jonizuojančiosios spinduliuotės sukeltos apšvitos modeliavimas

Apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės skaičiavimas ir jos priklausomybės nuo įvairių parametrų nustatymas yra šios dozės modeliavimas. Tai yra galutinis statybinių medžiagų įvertinimo radiacinės saugos požiūriu etapas, kurio rezultatai padeda nustatyti, nuo ko ši apšvitos dozė priklauso ir kokių radiacinės saugos priemonių reikia imtis.

Žmogaus apšvitos, gaunamos tam tikroje patalpoje, dozei įvertinti, literatūroje dažnai taikomas „standartinio kambario“ modelis. Šie kambariai būna įvairūs, tačiau visada jie tiksliai aprašomi, kad būtų aišku, kokie parametrai buvo naudojami modeliuojant apšvitos dozes.

Pavyzdžiui, (Koblinger, 1984) pateikiami trys kambarių tipai:

- gretasienis ($4 \times 8 \times 2,8$) m³ su 2350 kg·m⁻³ tankio ir 0,20 m pločio sienomis,
- sferinis su 2,7 m spinduliu,

- olos, apsuptos begalinio pločio sienomis, formos.

Panaudojus pirmąjį modelį bei laikant, kad tokioje patalpoje žmogus praleidžia 0,75 viso laiko, ir kad vėdinimo koeficientas yra 0,7, pagal (UNSCEAR, 1993) gaunami metinės efektinės dozės koeficientai F_x ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K atitinkamai yra: 2,91, 3,55, 0,27 $\mu\text{Sv}\cdot\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Išorinės apšvitos efektinė dozė gali būti skaičiuojama pagal formulę (Stoulos, 2003):

$$E_{\text{ext}} = F_{\text{Ra}} \sum w_i (1 - \varepsilon_i) C_{\text{Ra},i} + F_{\text{Th}} \sum w_i C_{\text{Th},i} + F_{\text{K}} \sum w_i C_{\text{K},i}, \quad (1.18)$$

čia w_i – tam tikro radionuklido svorinis daugiklis i -toje medžiagoje, C_i – radionuklido savitasis aktyvumas, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, ε_i – radono ekshaliacijos koeficientas.

Modeliuojant nustatyta, kad tipiškame Graikijos name, laikant, jog grindis dengia granito plytelės, bendra metinė efektinė dozė yra nuo 0,27 iki 0,71 mSv, iš kurios (13 – 30) % sudaro vidinės apšvitos nuo radono dozė. Išorinės apšvitos metinė efektinė dozė yra nuo 0,23 iki 0,53 mSv ir priklauso nuo statybinės medžiagos (Stoulos, 2003).

Panaudojus tą patį kambario modelį namams iš betono, metinė išorinės apšvitos dozė bus 0,2 mSv (Petropoulos, 2002).

(Ademola, J. A.; Farai, I. P., 2005) darbe aprašomi rezultatai, gauti modeliuojant apšvitos dozes kambariye, kurio matmenys yra $(3,6 \times 3,6 \times 3) \text{ m}^3$, sienų storis 10 cm ir tankis – $1,73 \cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Gauta, kad metinė sugertoji apšvitos nuo ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K spinduliuotės dozė jų aktyvumo vienetui atitinkamai yra 11, 36, 14,94 ir 0,92 μGy . Metinė efektinė nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozė įvairiuose Nigerijos miestuose yra nuo 209 iki 400 μSv .

(Pinnock, 1991) darbe nustatomas dozės ekvivalento parametras, skaičiuojamas pagal formulę:

$$D = Yt \sum [(Q_K C_{K,i} + Q_{\text{Ra}} C_{\text{Ra},i} + Q_{\text{Th}} C_{\text{Th},i}) m_i], \quad (1.19)$$

čia Q – koeficientai, parodantys sugertąją dozę kambario viduryje, C – tam tikro radionuklido i - savitasis aktyvumas toje medžiagoje, m – tos medžiagos masės dalis statybinėje konstrukcijoje, Y – sugertosios ir efektinės dozių ryšio koeficientas (Sv/Gy), t – valandų, praleidžiamų kambariye, skaičius per dieną.

Naudojant „standartinio kambario“ modelį (Koblenger, 1984) ir atitinkamų medžiagų parametrus, kambario parametrus bei buvimo patalpoje valandų skaičių per metus, (Pinnock, 1991) darbe nustatyta, kad vidutinė metinė išorinės apšvitos dozė yra $(0,54 \pm 0,05) \text{ mSv}$. Skirtumą nuo termoluminescencinio dozimetrom parodymų $((0,78 \pm 0,11) \text{ mSv})$ autoriai aiškina kosminės ir grunto spinduliuotės įtaka.

Kanadoje (Zikovsky, 1992) darbe naudotas modelis, aprašantis kambarį kaip olą su begalinio storio sienomis. Pasiūlyta formulė apšvitos dozei apskaičiuoti:

$$D = 0,134C_K + 3,09C_{Ra} + 4,18C_{Th}, \quad (1.20)$$

čia D – metinė efektinė dozė, mSv, C – tam tikro radionuklido savitasis aktyvumas medžiagoje, Bq·kg⁻¹.

Gauta, kad jeigu statybinėse medžiagose ⁴⁰K, ²²⁶Ra ir ²³²Th aktyvumai yra mažesni nei vidutinės jų reikšmės Kanadoje (atitinkamai, 370, 26 ir 27 Bq·kg⁻¹), sienos apsaugo žmogų nuo radionuklidų, esančių grunte, spinduliuotės. Patalpose gauta dozė bus mažesnė nei lauke – nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės gauta dozė bus mažesnė negu reikšmė, kuria dozė sumažėja dėl to, kad iš šių statybinių medžiagų pagamintos konstrukcijos sumažina grunte esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės intensyvumą. Jei radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose viršys radionuklidų, esančių dirvoje, aktyvumus, dozės galia patalpoje didės. Esant nurodytiems vidutiniams savitiesiems aktyvumams, metinė efektinė dozė bus 0,321 mSv.

(Sciocchetti, 1983) darbe prognozuojamas metinės apšvitos dozės padidėjimas skaičiuojamas pagal (UNSCEAR, 1977) nurodytas formules. Nors vidutiniškai Italijoje metinė vidutinė išorinės apšvitos dozė lygi 1 mSv, Lazio rajone tipiško namo gyventojas per metus gaus 2,37 mSv, o vidinė lygiavertė metinė plaučių apšvitos nuo įkvėpiamų radono skilimo produktų spinduliuotės dozė bus 14 mSv, nuo torono skilimo produktų spinduliuotės – 30 mSv.

JAV, Atlantoje, 1983 m. patalpose buvo ieškoma padidintų radionuklidų savitųjų aktyvumų, matuojant ekspozicinės dozės galią (ji neturėtų viršyti 5 μR·h⁻¹) (Kahn, 1983). Dozė pagal radionuklidų kiekį statybinėse medžiagose buvo skaičiuojama naudojantis kompiuterine programa FUDGE-1 (Kahn, 1983), pagal formulę (Beck, 1974):

$$D = 1,90C_U + 2,82C_{Th} + 0,179C_K, \quad (1.21)$$

čia D – metinė lygiavertė dozė (μR·h⁻¹), C – tam tikro radionuklido savitasis aktyvumas medžiagoje.

Vokietijoje 1986 m. dozių skaičiavimams buvo naudojamas kompiuterinė programa ZYLIA-3. Gauta, kad plytiniame name sugertosios dozės galia būtų 124 nGy·h⁻¹, o betoniniame name – 63 nGy·h⁻¹ (standartinio kambario viduryje). Jei namas pastatytas iš kelių medžiagų, skaičiuojant buvo įvedami atitinkami koeficientai. Taip pat šia programa buvo galima nustatyti dozės galią lauke, pavyzdžiui, kai žmogus stovi ant betonuoto kelio.

Kretos saloje daug namų statoma iš vietinių akmenų – granito. Dozės galia nustatoma pagal formulę (Kohshi, 2001):

$$D = A_i C_F, \quad (1.22)$$

čia D – sugertosios dozės galia, $\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$, C - dozės koeficientas. Dozės koeficientai ($\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{kg}$) buvo šie: $0,623 - {}^{232}\text{Th}$, $0,461 - {}^{238}\text{U}$ ir $0,0414 - {}^{40}\text{K}$ (UNSCEAR, 1993). Efektinės dozės galia nustatoma pagal formulę (Tzortzis, 2003):

$$H_E = DTF, \quad (1.23)$$

čia T – laikas, praleidžiamas patalpoje (7010 valandų per metus), F – sugertosios ir efektinės dozių ryšio koeficientas ($0,7 \text{ Sv/Gy}$).

Šitaip apskaičiuota metinė efektinė dozė patalpoje buvo nuo $0,1 \text{ mSv}$ iki $2,97 \text{ mSv}$.

Apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės (Maduar, 2004) buvo modeliuojamos patalpą išskaidant į tris stačiakampes baigtinio storio plokštes. Skaičiuojant atsižvelgta į spinduliuotės sugėrimą.

Įvairių šaltinių, kuriuose pateikiama informacija apie dozių skaičiavimus naudojant įvairius modelius, duomenys pateikiami 1.7 lentelėje.

1.7 lentelė. Išorinės metinės apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės reikšmės

Šalis ar vietovė	Metinė efektinė dozė, mSv	Statybai panaudotos medžiagos	Šaltinis
Graikija	$0,23 \div 0,53$	Granito plytelės	(Stoulos, 2003)
Jamaika	$0,2$	Betonas	(Petropoulos, 2002)
Kanada	$0,54$	Raudonas šlammas	(Pinnock, 1991)
Italija (Lazio)	$0,321$	Vietinės gamtinės statybinės medžiagos	(Zykovski, 1992)
JAV (Džordžija)	$2,37$	Betonas su fosfatų šlaku	(Sciocchetti, 1983)
Vokietija	$10 \mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$	Betonas	(Kahn, 1983)
Kreta	$1 \div 1,4$	Granitas	(Ettenhuber, 1986)
	$0,1 \div 2,97$		(Tzortzis, 2003)

Iš pateiktų 1.7 lentelėje duomenų matyti, jog didžiausios dozės reikšmės yra Italijoje Lazio rajone bei Kretoje, jei namai pastatyti iš granito. Tačiau šioje lentelėje pateikiama informacija tik iš nedidelės dalies potencialių tokios analizės objektų.

Visi modeliai pasižymi tuo, kad juose naudojami radionuklidų savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose matavimų rezultatai ir įvairūs parametrai, apibūdinantys šias medžiagas bei pastatus. Modeliai vienas nuo kito skiriasi skaičiavimams naudojamais parametrais ir jų skaičiumi, tačiau svarbiausi parametrai yra radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse

medžiagose, šių radionuklidų pasiskirstymas medžiagose ir medžiagų pasiskirstymas bei kiekis pastatuose. Didelę reikšmę apšvitos nuo radono, išsiskyrusio iš statybinių medžiagų, skilimo produktų jonizuojančiosios spinduliuotės dozėms turi patalpų vėdinimo intensyvumas.

Apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės modeliuoti ypač svarbu tada, kai šių radionuklidų savitieji aktyvumai yra artimi arba viršija didžiausius leistinus lygius. Tokiu atveju nusprendžiant apie statybinių medžiagų tinkamumą radiacinės saugos požiūriu, būtina remtis ne radionuklidų savitaisiais aktyvumais, bet galimomis apšvitos dozėmis. Taip yra todėl, kad apšvitos statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės priklauso ne tik nuo šių radionuklidų savitųjų aktyvumų. O nusprendus, ar reikia imtis radiacinės saugos priemonių, ir nustatant, kokios tos priemonės turi būti, būtina remtis galimos apšvitos dozių įvertinimo rezultatais.

Apskaičiavus efektinę dozę, galima įvertinti galimą jos neigiamą poveikį žmogui. Efektinės dozės, nulemtos statybinėse medžiagose esančių gamtinės kilmės radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės yra, palyginti mažos su avarijų atveju galimomis gauti apšvitos dozėmis, galimi atsitiktiniai jonizuojančiosios spinduliuotės poveikio reiškiniai – vėžys ir genetiniai pokyčiai.

Numatyti galimas dozes galima tik skaičiavimais. Vienas papildomų reikalavimų, keliamų šiems skaičiavimams, yra jų tikslumas ir rezultatų patikimumas. Tokius reikalavimus tenkina jau sukurtos ir išbandytos programos, naudojamos panašiais tikslais. Išanalizavus šių programų algoritmus, galima įvertinti jų tinkamumą specifiniam tikslui pasiekti – apskaičiuoti apšvitą nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozėms.

1.6. Išvados ir tolesnio darbo uždaviniai

1. Įvairiose šalyse išmatuotų gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai dažniausiai naudojamose to paties tipo statybinėse medžiagose dėl radionuklidų skirtingų kiekių žaliavose ir dėl gamybai naudojamų pramonės šalutinių produktų gali labai skirtis ir net viršyti nustatytus lygius.
2. Išmatuota įvairiose šalyse sugertosios dozės galia patalpų ore, sukelta statybinėse medžiagose esančių gamtinės kilmės radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės, yra plačiose ribose (nuo $19 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$ iki $2000 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$). Pagal ją vertinama metinė efektinė dozė gali viršyti leistinus lygius. Sudėtinga įvertinti radono, kuris sukelia vidinę apšvitą, išsiskiriančio iš statybinių medžiagų, įtaką, nes dažniausiai dalis radono patalpose susikaupia iš kito šaltinio – grunto.

3. Apšvitos dozės modeliavimas, naudojant savitųjų aktyvumų matavimų rezultatus, yra galutinis statybinių medžiagų įvertinimas radiacinės saugos požiūriu. Nuo pasirinktų modeliavimo programų parametrų priklauso rezultatų tikslumas ir patikimumas.
4. Statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė yra žymus žmonių apšvitos šaltinis. Būtina nustatyti statybinių medžiagų klasifikavimo galimos apšvitos požiūriu principus ir identifikuoti medžiagas, kuriose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės sukeltos apšvitos dozės gali būti didžiausios.
5. Naujomis statybinių medžiagų gamybos technologijomis gali būti pagaminamos statybinės medžiagos, kuriose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės sukeltą apšvitą reikia riboti.
6. Būtina analizuoti, kokią įtaką apšvitai turi ir radonas, išsiskyręs iš statybinių medžiagų, bei jo skilimo produktai, kadangi šis radono šaltinis kai kuriais atvejais gali būti didžiausias.
7. Būtina atsižvelgti į tai, kad statybinėse medžiagose gali būti dirbtinės arba gamtinės kilmės radionuklidų, kurių savitieji aktyvumai padidėjo dėl žmogaus veiklos.
8. Nors yra sukaupta plati faktinė apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės tyrimų medžiaga, būtini kompleksiniai tyrimai, kuriais būtų įvertinti ne tik atskiri šios apšvitos aspektai, bet jos vieta ir svarba tarp kitų apšvitos šaltinių, šios apšvitos formavimosi ir kitimo dėsningumai bei nustatyta, kaip optimizuoti apsaugą nuo jos.

2. Tyrimų metodai, medžiagos ir priemonės

Tyrimai buvo atlikti Radiacinės saugos centre 1998 – 2006 metais.

2.1. Statybinių medžiagų klasifikavimas galimos apšvitos nuo jose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės požiūriu

Šiuo metu gaminama ir naudojama daug įvairių statybinių medžiagų. Atlikti radionuklidų savitųjų aktyvumų tyrimus jose visose yra sudėtinga. Be to ne visose statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė gali sukelti tokias apšvitos dozes, kad jas reikėtų mažinti. Todėl labai svarbu suklasifikuoti statybines medžiagas pagal galimos apšvitos nuo jose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dydį.

Tai padėtų optimizuoti radionuklidų savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose tyrimus, nes būtų nustatyta, kokiose statybinėse medžiagose šiuos tyrimus atlikti reikia pirmiausia. Tai turėtų būti medžiagos, kuriose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės sukeltos apšvitos dozės gali būti didžiausios.

Galimos apšvitos požiūriu buvo inventorizuojamos Lietuvoje naudojamos, gaminamos ir į mūsų šalį įvežamos statybinės medžiagos. Remtasi Statybinės produkcijos sertifikavimo centro naudojamomis statybinių medžiagų klasėmis. Pagal galimą apšvitą buvo suskirstytos plytos, blokeliai, kiti gaminiai atitvaroms, betonas, skiediniai, rišamosios medžiagos, mineraliniai užpildai, termoizoliacinės medžiagos, mediniai gaminiai. Klasifikuojant neįtraukti langai, durys, dažai, lakai, glaistai, antiseptikai, antipirenai, šildymo, vandentiekio, vėdinimo įrenginiai, stiklo gaminiai, stogo dangos, nes jų naudojama arba maži kiekiai, arba radionuklidų savitieji aktyvumai juose yra maži.

Inventorizuojant atsižvelgta į parametrus, nuo kurių priklauso apšvita nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės. Šie parametrai yra:

- galimi radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose,
- kiekiai, kuriais statybinės medžiagos naudojamos,
- vietos, kur statybinės medžiagos naudojamos.

Šie kriterijai pasirinkti todėl, kad dozė, kurią gaus žmonės, būdami aplinkoje, sukurtoje iš tam tikrų statybinių medžiagų, priklauso nuo radionuklidų aktyvumų šioje aplinkoje (vadinasi, nuo radionuklidų savitųjų aktyvumų medžiagose ir medžiagų kiekių aplinkoje) ir atstumo nuo šių radionuklidų iki žmogaus (to, kaip arti nuo žmogaus tos statybinės medžiagos gali būti).

Kai kuriais atvejais galimi radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose nėra žinomi. Tokiu atveju remtasi radiacinės saugos konservatyvumo principu ir laikyta, jog gamtinės

kilmės radionuklidų tokiose medžiagose gali būti daug. Nustatant medžiagų tipą šio parametro požiūriu taip pat buvo remiamasi tuo, iš kokių žaliavų šios medžiagos pagamintos.

Apibrėžti, ką reiškia dideli radionuklidų aktyvumai statybinėse medžiagose, yra sudėtinga. Iš kitos pusės, priskyrus šiems aktyvumams skaitinę reikšmę ar net jų intervalą, nebereiktų atlikti šių aktyvumų matavimų. Toks skirstymas yra orientacinio pobūdžio, o jo tikslas ne apibrėžti apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dydį, bet identifikuoti statybines medžiagas, kurias reikia detaliau ištirti.

Panašiai yra ir su kitu parametru – naudojamu statybinių medžiagų kiekiu, nors šis parametras yra lengviau apibrėžiamas. (Higienos norma HN 85-2003) nurodoma, kad nedideliu statybinių medžiagų kiekiu laikoma ne daugiau kaip 10 % bendro panaudoto statybinių medžiagų kiekio. Šis skaičius atspindi radiacinės saugos konservatyvumo principą. Juo ir buvo remtasi klasifikuojant. Trečiasis klasifikavimo parametras yra vieta, kur statybinė medžiaga naudojama. Atsižvelgiant į (Higienos norma HN 85-2003) pateiktą klasifikavimą, į skirtingas grupes buvo išskirtos statybinės medžiagos, naudojamos:

- namo statybai, vidaus apdailai viduje,
- išorės apdailai, gatvių, aikščių statybai, aplinkos tvarkymui, landšafto formavimui lauke.

Klasifikuojant statybinės medžiagos buvo paskirstytos į aštuonias klases. Šių klasių apibūdinimai pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Statybinių medžiagų klasės

Klasė	Galimi radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose	Kiekiai, kuriais statybinės medžiagos naudojamos	Vietos, kur statybinės medžiagos naudojamos
1	Dideli	dideli	viduje
2	Dideli	maži	viduje
3	Maži	dideli	viduje
4	Maži	maži	viduje
5	Dideli	dideli	lauke
6	Dideli	maži	lauke
7	Maži	dideli	lauke
8	Maži	maži	lauke

Toks statybinių medžiagų skirstymas yra daugiau orientacinio pobūdžio. Tai reiškia, kad bet kuriuo atveju turi būti atliekami radionuklidų savitųjų aktyvumų tyrimai statybinėse medžiagose ir įvertinama, kokios apšvitos nuo šiose statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės bus. Tiriamos ir įvertinamos pirmiausia turi būti tos statybinės medžiagos, kuriose esančių radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė gali sukelti didžiausias dozes. Tačiau negalima ignoruoti ir tų statybinių medžiagų, kurios skirstant patenka į „mažesnės apšvitos“ klases. Visada egzistuoja tam tikra tikimybė, kad apšvitos nuo

jose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės gali būti ir didelės. Viena to priežasčių yra statybinių medžiagų gamybai vis dažniau naudojami šalutiniai pramonės produktai ir technologinių procesų atliekos, todėl tokiose statybinėse medžiagose gali būti dideli radionuklidų savitieji aktyvumai.

Svarbu ir tai, jog radionuklidų savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose tyrimai padeda nustatyti šio skirstymo pagrįstumą.

2.2. Statybinių medžiagų bandinių atrinkimas ir paruošimas tyrimams

Statybinių medžiagų bandiniai buvo atrenkami keliais būdais.

Dalis statybinių medžiagų bandinių buvo renkama pas gamintojus ir tiekėjus iš pasirinktos partijos, kartu paimant žaliavų bandinius. Partija čia laikomos statybinės medžiagos, pagamintos pagal tą pačią technologiją iš tų pačių žaliavų. Kitus bandinius atgabendavo klientai, vykdydami mūsų šalyje galiojančius statybinių medžiagų radiologinio įvertinimo reikalavimus.

Gamtinės kilmės radionuklidų aktyvumo pasiskirstymo statistiniam įvertinimui buvo imamas tam tikras tos pačios partijos bandinių skaičius.

Statistiniam įvertimui taip pat buvo paimti gamtinės žaliavos bandiniai iš smėlio ir žvyro karjero per visą kasavietės ilgį 1 metro atstumais tarp bandinių ėmimo taškų. Siekiant nustatyti statistinį iš tokių žaliavų pagamintų statybinių medžiagų radionuklidų savitųjų aktyvumų pasiskirstymą, buvo paimti ir tų medžiagų bandiniai - įvairių frakcijų mineraliniai užpildai.

Buvo tiriami ir iš vieno bandinio paruošti mėginiai.

Bandiniai buvo renkami naudojantis Statybos produkcijos sertifikavimo centro sertifikuotų medžiagų sąrašais. Kai kurie bandiniai buvo surinkti jau uždarytose plytinėse, nes iš tų plytų pastatytuose namuose žmonės tebegyvena. Atliekant radono gyvenamosiose patalpose matavimus, buvo taip pat rinkti statybinių medžiagų, kurios buvo naudojamos šių namų statybai, bandiniai.

Atskira rūšis bandinių buvo senųjų pastatų ar jų liekanų bandiniai. Juos atrinko, aprašė ir pristatė Lietuvos istorijos instituto Miestų tyrimų skyriaus darbuotojai.

Visi bandiniai buvo aprašomi, nurodant jų tipus, pavadinimus, identifikavimo žymenis, atrinkimo vietas, atrinkusius asmenis. Taip buvo užtikrinta bandinių parametrų kontrolė.

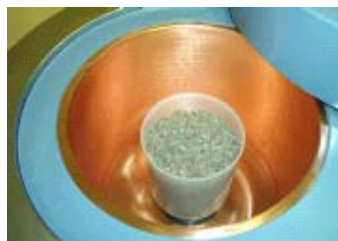
Ruošiant žaliavų ir mineralinių užpildų mėginius, jie buvo džiovinami 105°C temperatūroje džiovinimo krosnyje (2.1 paveikslas), smulkinami, kad homogeniškai būtų užpildomos matavimo kiuvetės (2.2 paveikslas).



2.1 pav. Statybinių medžiagų bandinių džiovinimas krosnyse Binder ir Selecta



2.2 pav. Statybinių medžiagų bandiniai matavimo kiuvetėse



2.3 pav. Matavimo kiuvetė ant gama spektrometro detektoriaus

2.3. Gama spektrometriniai tyrimai

Gama spektrometrija yra medžiagos neardančiosios analizės metodas, skirtas identifikuoti gama radionuklidus ir išmatuoti jų savituosius aktyvumus įvairiuose bandiniuose (International standard IEC 1452:1995).

Gama spektrometrijoje naudojama dvi svarbios gama spinduliuotės savybės – tai, kad jos energija yra charakteringa ją spinduliuojančiam radionuklidui, ir tai, kad ši spinduliuotė yra

monoergetinė. Registruojamas gama kvantų pasiskirstymas pagal jų energijas (gama spektras), kuriame būna smailės, atsiradusios dėl to, kad tam tikrų energijų kvantų spinduliuotės pluošte yra daugiau už kitų energijų kvantus. Tai naudojama nustatyti, koks radionuklidas spinduliuoja registruojamus kvantus. Kvantinė išeiga (tam tikros energijos kvanto išspinduliavimo tikimybė) taip pat yra charakteringa gama radionuklidui. Ji naudojama nustatyti skylančių branduolių skaičiui, t. y., įvertinti radionuklidų aktyvumams (International standard IEC 1452:1995).

Gama spektrometrija yra tyrimų metodas, nereikalaujantis sudėtingų mėginio paruošimo procedūrų. Tai yra jautrus, aiškus ir kontroliuojamas metodas.

Gama spektrometrų detektoriams naudojamos įvairios medžiagos. Tačiau natrio jodidas, aktyvuotas taliumu (NaI(Tl)), ir grynas germanis Ge dėl jų savybių yra naudojami plačiausiai. Gama kvantams nuo keliolikos keV registruoti naudojami šie du detektorių tipai.

Tiriant statybines medžiagas, NaI(Tl) detektorius naudoti yra sudėtinga, kadangi jie pasižymi nedidele skiriamąja geba, o statybinėse medžiagose esantys gamtinės kilmės radionuklidai spinduliuoja daugelio energijų kvantus, kurie spektruose sąlygoja daug smailių. Kaip minėta, ši problema kartais sprendžiama kartu su NaI(Tl) spektrometrais naudojant specialias kompiuterines programas. Tačiau net su šiomis programomis sunku pasiekti pakankamą matavimų tikslumą.

Šiame darbe statybinių medžiagų gama spektrometriniai tyrimai buvo atlikti pagal akredituotą procedūrą (Darbo instrukcija „Gama spektrometrija. Standarto IEC 1452:1995 papildymas“. PES-G:2004). Radionuklidų savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose matavimams buvo naudoti Ge spektrometrai. Ge sistemų skiriamoji geba yra daug didesnė palyginus su NaI(Tl) sistemomis. Todėl Ge spektrometrinės sistemos naudojamos sudėtingiems spektrams analizuoti. Jų registravimo efektyvumas, palyginus su NaI(Tl) detektorių efektyvumu, yra mažas, tačiau dabar, naudojant naujas technologijas, gaminami dideli Ge kristalai ir jų efektyvumas yra didesnis.

Gama spektrometrų charakteristikos, kurios yra svarbios ir buvo nustatytos parengiant juos darbui, yra šios:

- energetinis kalibravimas – ryšys tarp spektrometro kanalo ir jame registruojamų gama kvantų energijos,
- registravimo efektyvumas – santykis tarp per laiko vienetą užregistruotų kvantų ir kvantų, kuriuos išspinduliuoja šaltinis per laiko vienetą, skaičių,
- skiriamoji geba – smailės plotis pusėje jos aukščio,
- smailės ir Komptono plotų santykis 1332 keV energijos ^{60}Co smailei – santykis tarp šios smailės aukščio ir pagrindo (plato) srityje nuo 1040 ir 1096 keV vidutinio aukščio,

- santykinis smailės efektyvumas detektoriui charakterizuoti – santykis tarp taškinio šaltinio ^{60}Co 1332 keV smailės registravimo efektyvumo ir tos pačios smailės registravimo NaI(Tl) kristalu, kurio aukštis – 7,6 cm ir skersmuo 7,6 cm, efektyvumo, kai atstumas tarp šaltinio ir detektoriaus yra 25 cm,
- fonas – spektras su smailėmis, atsiradusiomis dėl aplink detektorių ir jame esančių radionuklidų spinduliuotės bei spinduliuotės, atsirandančios kosminei spinduliuotei sąveikaujant su aplink detektorių esančiomis medžiagomis.

Radionuklidų savitieji aktyvumai mėginyje skaičiuojami pagal formulę:

$$C = \frac{S}{\varepsilon \cdot t \cdot m \cdot \gamma}, \quad (2.1)$$

čia S – smailės plotas atėmus jos pagrindo plotą, ε – sistemos registravimo efektyvumas, t – matavimo laikas (spektro rinkimo laikas), m – mėginio masė, γ – nagrinėjamąją smailę nulėmusių gama kvantų kvantinė išeiga.

Smailės plotas nustatomas sudedant užregistruotų impulsų skaičius atitinkamoje smailėje ir atimant po smaile esančio kontinuumo plotą. Jeigu tokios pat smailės yra ir fono spektre, gali būti atimami šių foninių smailių plotai.

Tai pagrindinė formulė, naudojama skaičiuojant. Joje gali būti korekciniai koeficientai, iš kurių vienas svarbiausių yra tikrųjų sutapčių korekcijos (angl. *correction for true coincidence summing*) koeficientas, naudojamas tais atvejais, kai vieno skilimo metu išspinduliuojami du gama kvantai ir spektrometrinė sistema juos užregistruoja kaip vieną. Registruojant gamtinės kilmės radionuklidų aktyvumus, tikrųjų sutapčių korekcijos koeficientas nenaudojamas, nes tokių radionuklidų minėtų gamtinės kilmės radionuklidų šeimose nėra.

Registravimo efektyvumas taip pat priklauso nuo kvantų sugerties mėginyje. Todėl gama spektrometrinių sistemų efektyvumas buvo kalibruojamas skirtingo tankio – vandens ir grunto - kalibravimo šaltiniais.

Gama spektrometrinių sistemų efektyvumui kalibruoti buvo naudojami tokios pačios geometrijos standartiniai šaltiniai, kokios geometrijos matavimo kiuvetės vėliau buvo naudojami tirti mėginiams.

Radionuklidų savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose tyrimams buvo naudotos Radiacinės saugos centre esančios gama spektrometrinės sistemos:

- mažo fono gama spektrometrinė sistema su gryo germanio koaksialiniu detektoriumi (germanio koaksialinis detektorius, kurio kristalo skersmuo – 61 mm, ilgis – 38 mm, santykinis efektyvumas – 25 %, įtampa – +4500 V, smailės plotis pusei maksimumo – 1,72 keV (kai energija – 1332 keV), apsauga susideda iš švino (100 mm), kadmio

(1 mm) ir vario (1 mm), spektrų analizės programos Genie 2000 versija G2K-CPCE1 V2.1A,

- gama spektrometrinė sistema su gryno germanio koaksialiniu detektoriumi (detektoriaus kristalo skersmuo – 55 mm, aukštis – 41,5 mm, santykinis efektyvumas – 20 %, įtampa – +4000 V, smailės plotis pusei maksimumo – 1,79 keV (1332 keV energijai), apsauga susideda iš švino (50 mm), kadmio (1 mm) ir vario (1 mm), spektrų analizės programos Genie 2000 versija V1.3),
- gama spektrometrinė sistema su gryno germanio koaksialiniu detektoriumi (kristalo diametras – 55,5 mm, ilgis – 55,3 mm, santykinis efektyvumas – 25 %, įtampa – +2800 V, smailės plotis ties puse maksimumo – 1.95 keV (1332 keV energijai), apsauga susideda iš švino (100 mm), kadmio (1 mm) ir vario (1 mm), spektrų analizės programos PCA3, GammaTrac versija 2.42),
- mažo fono ir plataus energijų intervalo gama spektrometrinė sistema su gryno germanio koaksialiniu detektoriumi (detektorius, kurio kristalo skersmuo – 70 mm, ilgis – 25 mm, santykinis efektyvumas – 26,3 %, įtampa – +3500 V, smailės plotis pusei maksimumo 1,794 keV (1332 keV energijai), su 0,5 mm storio anglies epoksido langu, galintis registruoti energijas nuo 30 keV, apsauga susideda iš švino (100 mm), kadmio (1 mm) ir vario (1 mm), spektrų analizės programos Genie 2000 versija G2K-CPCE1 V3.1A.

Spektrometrinės sistemos parodytos 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Matavimams naudotos gama spektrometrinės sistemos

Matavimams naudota ir pagalbinių įranga:

- bandinių smulkintuvai,
- svarstyklės,
- matavimo kiuvetės (trijų tipų 500 ml tūrio Marinelli geometrijos ir 50 ml cilindrinės kiuvetės).

Siekiant sumažinti matavimų aplinkos sąlygų poveikį matavimų rezultatams, jos buvo kontroliuojamos planuojant laboratorijos patalpų rekonstrukciją, ją atliekant ir baigus.

Statybinėse medžiagose, naudotose įrengti gama spektrometrijos patalpą, radionuklidų savitieji aktyvumai neviršijo: ^{226}Ra – $(68 \pm 10) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, ^{232}Th – $(29 \pm 3) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, ^{40}K – $(293 \pm 26) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$. Tai rodė, kad statybinės medžiagos yra standartinės, gamtinių radionuklidų savitieji aktyvumai jose nedideli. Jie nedaro didelės įtakos fono spektrui. Dirbtinės kilmės radionuklidų šiose medžiagose neužfiksuota. Labai svarbu, kad fono spektre nebūtų dirbtinės kilmės radionuklidų smailių.

Tinkamoms aplinkos sąlygoms gama spektrometrijos patalpoje palaikyti įrengta mechaninė ištraukiamoji vėdinimo sistema ir oro kondicionavimo sistema, palaikanti nustatytą temperatūrą ir drėgmę. Gama spektrometrų patalpoje nuolat kontroliuojama ir registruojama temperatūra, santykinė drėgmė, radono tūrinis aktyvumas, sugertosios dozės galia.

Kad būtų išvengta mikrofoninio efekto, po kiekvieno gama spektrometro Diuaro indu padėti plastmasės ir medžio padėklai. Šalia gama spektrometrijos patalpos nedirbama jokiais prietaisais, sukeliančiais vibraciją. Iš grindų ir po jomis esančio grunto gama spinduliuotės intensyvumui sumažinti ant grindų po detektorių Diuaro indais yra 5 cm švino sluoksniai. Gama spektrometrinės sistemos elektroniniai blokai maitinami per nepertraukiamo energijos tiekimo įrenginius UPS.

Buvo naudojamos Marinelli geometrijos 500 ml tūrio matavimo kiuvetės. Naudojant Marinelli kiuvetę, pasiekiamas didžiausias registravimo efektyvumas koaksialiniams detektoriams. Tokią kiuvetę tinka naudoti tada, kai bandinio yra užtektinai ir jo aktyvumas nėra labai didelis. Visos Marinelli kiuvetės užpildomos iki viršaus. Matuojant su plataus energijų intervalo detektoriais geriau buvo naudojama cilindrinė kiuvetė, kurios skersmuo artimas kristalo skersmeniui.

Spektras registruojamas ant detektoriaus uždėjus matavimo kiuvetę su mėginiu. Kad detektoriai būtų apsaugoti nuo radioaktyviosios užteršimo, jie uždengiami plono polietileno maišeliais.

Gamtinių radionuklidų savitieji aktyvumai apskaičiuojami pagal šiuos radionuklidus ar jų kvantų smailes su didžiausia kvantine išeiga arba pagal radionuklido visų smailių svertinį vidurkį:

- ^{226}Ra ,
- ^{232}Th – pagal ^{228}Ac ,
- ^{40}K .

Didelis dėmesys buvo skiriamas kokybės kontrolei. Ji yra efektyviausias būdas gama spektrometrų darbo stabilumui tikrinti. Tikrinami svarbiausi parametrai, kurie lemia matavimų

kokybę – energijos ir efektyvumo kalibravimas, skiriamoji geba, fonas. Kokybės kontrolės matavimų tikslas yra nustatyti, ar šie parametrai yra apibrėžtuose intervaluose. Remiantis kokybės kontrolės matavimais, galima daryti vieną iš šių trijų išvadų:

- sistema veikia gerai,
- sistema veikia nustatytų intervalų ribose, tačiau jau yra įspėjimas apie galimus sutrikimus,
- sistema veikia nepatenkinamai ir reikia imtis pataisomųjų veiksmų.

Kontroliuojami parametrai (susiję su aktyvumo matavimais) buvo tikrinami matuojant specialius gama spinduliuotės šaltinius. Kokybės kontrolei naudojami ^{60}Co ir ^{137}Cs taškiniai šaltiniai. Matavimai visada atliekami kontrolinius šaltinius padėjus toje pačioje padėtyje detektoriaus atžvilgiu (juos uždėjus ant Marinelli kiuvetės dangtelio pažymėtoje vietoje).

Gama spektrometrinių sistemų veikimas vertinamas pagal matavimo rezultatų nuokrypį nuo vidurkio, kuris skaičiuojamas iš visų prieš tai gautų to paties tipo duomenų. Jei šis nuokrypis neviršija 2σ (standartinių nuokrypių), sistema veikia gerai. Jei nuokrypis yra tarp 2 ir 3 σ , sistema dirba patenkinamai, priemonių imtis nereikia, tačiau įspėjama, kad gali kilti problemų. Tai reiškia, kad reikia atidžiau stebėti spektrometro darbą.

Tokiu atveju atliekami papildomi probleminių parametrų kokybės kontrolės matavimai:

- fono matavimai – po dviejų darbo dienų,
- energijos ar efektyvumo kalibravimo ar skiriamosios gebos – savaitės pradžioje, prieš matavimų seriją, po elektros tiekimo nutrūkimo arba kai spektrometras pradeda dirbti nestabiliai.

Jei nuokrypis didesnis negu 3 σ , sistema dirba nepatenkinamai ir būtina nedelsiant imtis koregavimo veiksmų.

Šio darbo rezultatuose visur pateikiama dviejų standartinių nuokrypių dydžio neapibrėžtis.

Gama spektrometrinėms sistemoms kalibruoti buvo naudoti pamatiniai etalonai ir pamatinės medžiagos, pagamintos iš paliudytųjų pamatinių medžiagų – tirpalų. Tais atvejais, kai matuojant buvo naudojama nestandartinė geometrija (mėginio buvo mažiau negu 50 ml ar mėginio tankis labai skyrėsi nuo kalibravimui naudoto pamatinio etalono tankio), buvo naudojamas matematinis kalibravimas, kurio esmė yra tai, kad kompiuterinė programa pagal Monte Carlo metodą apskaičiuoja sistemos registravimo efektyvumą naudotojo aprašytai geometrijai ir mėginio tankiui bei medžiagai. Matematinis kalibravimas galimas tik gamykloje charakterizuotiems detektoriams (detektoriams, kurių savybės, lemiančios registravimo efektyvumą, žinomos). Šis kalibravimas buvo tikrinamas naudojant paliudytąsias medžiagas.

Matavimų tikslumui užtikrinti nuo 1997 metų kiekvienais metais dalyvaujama įgūdžių testuose, tarptautiniuose ir Lietuvos tarplaboratoriniuose matavimuose. Jų metu buvo tikslinamas gamtinės ir dirbtinės kilmės radionuklidų skirtingose matricose tyrimų tikslumas.

Gama radionuklidų savitiesiems aktyvumams statybinių medžiagų bandiniuose matuoti naudojamas standartinis gama spektrometrijos metodas, tinkamą dėmesį skiriant kokybės laidavimui. Tai leidžia padidinti matavimų rezultatų patikimumą, supaprastinti ir pagreitinti pačius matavimus. Atliekant matavimus ir pateikiant jų rezultatus laikytasi standarto (LST EN ISO/IEC 17025:2003) reikalavimų. Taip pat naudojami šiame standarte pateikti terminai. Matavimo neapibrėžtys skaičiuojamos su 95 % pasiklovimo tikimybe (Darbo instrukcija „Gama spektrometrija. Standarto IEC 1452:1995 papildymas“. PES-G:2004).

2.4. Radono tūrinių aktyvumų patalpose matavimas

Radono tūriniai aktyvumai buvo matuojami dviem būdais: E-PERMTM elektretais ir Alpha Guard radono monitoriais.

Radiacinės saugos centre esančiais monitoriais AlphaGUARD PQ2000 (Genitron Instruments GmbH, Vokietija) (2.5 paveikslas) matuojamas radono tūrinis aktyvumas, atmosferinis slėgis, oro temperatūra ir santykinė drėgmė patalpose. Radono tūrinis aktyvumas matuojamas monitoriuje esančia 0,56 l aktyviojo tūrio jonizacine kamera, į kurią radonas patenka per stiklo skaidulų filtrą, sulaikantį radono skilimo produktus. Vieno matavimo trukmė yra 10 arba 60 minučių. Šis matuoklis naudojamas tada, kai reikia nustatyti, kaip radono tūriniai aktyvumai tiriamojoje patalpoje kinta laike. Rezultatams apdoroti naudojama kompiuterinė programa Aexpert.



2.5 pav. AlphaGUARD PQ2000 radono monitorius

Ilgai trunkantiems integruojantiems radono tūrinio aktyvumo patalpose matavimams buvo naudojami Radiacinės saugos centre esantys E-PERMTM elektretai, pagaminti JAV, Rad Elec Inc. (2.5 paveikslas). Ši matavimo sistema susideda iš įelektrinto teflono disko, jonų kameros iš elektrai laidžios plastmasės ir disko paviršiaus potencialo matavimo prietaiso.

Teflono diskas įelektrinamas jį gaminant. Kameros viduje diskas sukuria elektrinį lauką, todėl neigiami jonai, atsiradę kameroje skylant radonui, veikiami elektrinio lauko, nusėda ant teigiamai įelektrinto disko paviršiaus. Dėl to paviršiaus potencialas mažėja, o šis sumažėjimas priklauso nuo ant paviršiaus nusėdusių jonų krūvių. Naudojantis specialia lygtimi (2.2) ir atsižvelgiant į potencialo sumažėjimą ΔU , matavimo trukmę t ir apšvitos nuo gama spinduliuotės dozės galią, apskaičiuojamas radono tūrinis aktyvumas A tiriamojoje patalpoje.

$$A = k \frac{\Delta U}{t} - K_f, \quad (2.2)$$

čia k – sistemos kalibravimo koeficientas, K_f – pataisa dėl gama spinduliuotės, mažinančios elektreto paviršiaus potencialą, įtakos.

Matavimų rezultatai apdorojami programa RADON.EXE, kuri kartu kuria duomenų bazę (Morkūnas, 2000).



2.6 pav. E-PERMTM elektretas kameroje matavimo padėtyje

Visais atvejais radono tūriniai aktyvumai matuojami atokiai, ne arčiau kaip 1 m atstumu nuo šildymo ir kondicionavimo prietaisų, langų, durų ir kitų vietų, prie kurių galimi oro srautai, ne arčiau kaip 30 cm nuo sienų. Visi matavimo prietaisai sukalibruoti gamintojo (elektretai) ir Švedijos radiacinės saugos institute SSI (radono monitoriai). Šie matavimų metodai irgi yra standartizuoti, todėl gaunami patikimi matavimų rezultatai.

Matavimų kokybei užtikrinti 2002 ir 2003 metais dalyvauta palyginamuosiuose matavimuose, kuriuos organizavo Didžiosios Britanijos Nacionalinės radiacinės saugos valdyba (NRPB).

2.5. Ore sugertosios dozės galios matavimai patalpose

Sugertosios dozės galia patalpoje matuojama kalibruotu dozės galios matuokliu (su scintiliaciniu detektoriumi), esančiu Radiacinės saugos centre, kambario viduryje, ne arčiau 30 cm nuo sienų toje vietoje, kurioje matuojamas radono tūrinis aktyvumas.

Ore sugertosios dozės galia patalpoje buvo matuojama ir nuolat matuojančiu dozės galios matuokliu GammaTracer su dviem Geigerio-Miulero detektoriais (gamintojas Genitron Instruments GmbH, Vokietija) (2.7 paveikslas), kuris yra Radiacinės saugos centre. Dozės galią jis vidurkina kas dvi valandas. Matavimų rezultatai apdorojami kompiuterine programa GEXPERT. Atliekant tyrimus, dozės galios matuoklis buvo statomas šalia radono monitoriaus AlphaGUARD. Toje pačioje vietoje ir tuo pačiu metu buvo atliekami ir dozės galios matavimai.



2.7 pav. Dozės galios matuoklis GammaTracer.

2.6. Apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės modeliavimas

Išorinei apšvitai nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės modeliuoti naudojama kompiuterinė programa „VISIPLAN-3D“, sukurta Belgijos Branduolinių tyrimų centre SCK-CEN.

Šios programos pagrindą sudaro fundamentiniai skvarbiosios spinduliuotės sąveikos su medžiaga dėsniai – eksponentinis siauro spinduliuotės pluošto slopinimo dėsnis:

$$\Phi(x) = \Phi_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (2.3)$$

ir spinduliuotės slopinimo, kai jos pluoštas yra platus, dėsnis.

$$\Phi(x) = \Phi_0 \cdot B \cdot e^{-\mu x}, \quad (2.4)$$

čia $\Phi(x)$ – medžiagos sluoksnį x praėjęs spinduliuotės srautas, Φ_0 – į tiriamos medžiagos paviršių (storio x sluoksnį) krentantis spinduliuotės srautas, μ – ilginis spinduliuotės silpninimo koeficientas, B – koeficientas, atspindintis plataus spinduliuotės pluošto įtaką jos sugerčiai (angl. *buildup factor*).

Ilginis spinduliuotės silpninimo koeficientas:

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa, \quad (2.5)$$

čia τ – ilginis spinduliuotės silpninimo dėl fotoelektrinės absorbcijos koeficientas, σ – ilginis spinduliuotės silpninimo dėl Komptono sklaidos koeficientas, κ – ilginis spinduliuotės silpninimo dėl porų susidarymo koeficientas.

Tuo atveju, kai spinduliuotę sugeria medžiagų mišinys, galioja lygybė:

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i, \quad (2.6)$$

čia w_i – mišinio i -tojo komponento dalis masės vienetais.

Santykis $\frac{\mu}{\rho}$ yra vadinamas masiniu spinduliuotės silpninimo koeficientu. Indeksas c siejamas su medžiagų mišiniu, i – su atskiru mišinio komponentu.

Gama kvantų srautas atstumu r nuo taškinio šaltinio yra:

$$\Phi = \frac{S \cdot B \cdot e^{-b}}{4\pi \cdot r^2}, \quad (2.7)$$

čia S – gama kvantų skaičius, šaltinio spinduliuojamas per sekundę.

Koeficientu b aprašomas vidutinis kvantų laisvojo kelio ilgis. Jis atspindi medžiagų, kurios sugeria kvantus, mišinio sugėrimo efektyvumą ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$b = \sum \mu_i \cdot \tau_i, \quad (2.8)$$

čia μ_i – i -tosios medžiagos ilginis spinduliuotės silpninimo koeficientas, τ_i – atstumas, kurį gama kvantas nusklinda medžiagoje i .

Kiekvienas jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinis yra ne taškinis, o tūrinis, todėl gali būti laikomas taškinių šaltinių visuma. Tokiu atveju:

$$\Phi = \int_V \frac{S \cdot B \cdot e^{-b}}{4\pi \cdot r^2} dV, \quad (2.9)$$

čia S – šaltinio tūrio vieneto spinduliuojamų kvantų skaičius per laiko vienetą.

Sugertosios dozės D ir gama kvantų srauto ryšys:

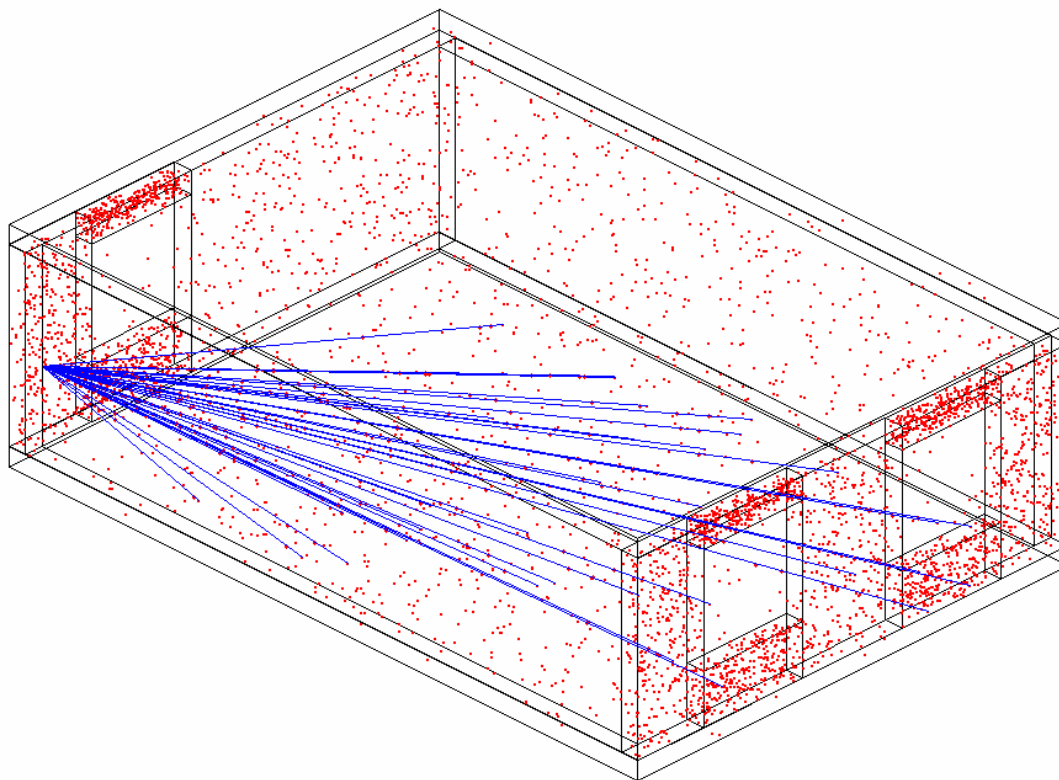
$$D = \frac{\sum \Phi_i E_i}{m}, \quad (2.10)$$

čia E_i – gama kvantų energija, Φ_i – šią energiją turinčių kvantų srautas, m – medžiagos, kurioje sugeriami gama kvantai, masė.

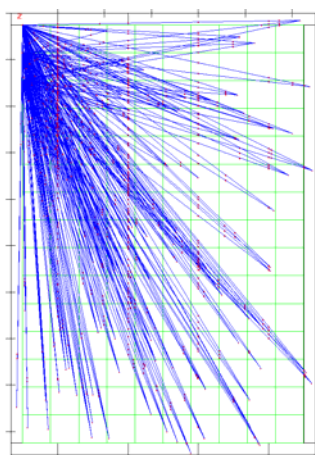
Norint apskaičiuoti lygiavertę dozę, sugertąją dozę reikia dauginti iš svorinio spinduliuotės daugiklio.

Programa „VISIPLAN-3D“ apskaičiuojami gama kvantų spinduliuojamų iš anksto aprašyto šaltinio, srautai bet kuriame taške. Remiantis šia informacija, apskaičiuojamos apšvitos nuo analizuojamo šaltinio spinduliuotės dozės ir nustatomas jų pasiskirstymas erdvėje.

2.8 paveiksle schematiškai parodyta, kaip sumuojami jonizuojančiosios spinduliuotės srautai iš įvairių tam tikros formos jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinio taškų.



2.8 pav. Jonizuojančiosios spinduliuotės srautų iš buto konstrukcinių elementų (sienų, lubų ir grindų) kaip jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinio taškų sumavimas programa „VISPLAN-3D“



2.9 pav. Jonizuojančiosios spinduliuotės srautų iš buto konstrukcinių elementų (sienų, lubų ir grindų) kaip jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinio taškų sumavimas plokštumoje lygiagrečioje grindims 1,25 m aukštyje programa „VISPLAN-3D“

Toks srautų sumavimas atliekamas visuose nagrinėjamuose taškuose. Šių taškų padėtis ir skaičių nustato programos naudotojas. Tokiu būdu galima modeliuoti dozių pasiskirstymus įvairiose plokštumose.

Dozių modeliavimas naudojant „VISPLAN-3D“ susideda iš šių etapų (Vermeersch, 2005):

- analizuojamo modelio kūrimo,
- analizės.

Kuriant modelį, aprašoma:

- šaltinio geometrija,
- medžiaga, iš kurios šaltinis sudarytas,
- radionuklidai, esantys šaltinyje, ir jų aktyvumai.

Kadangi programa leidžia pasirinkti įvairius elementariusius tūrius (stačiakampį, gretasienį, gretasienį, cilindrą, tuščiavidurį cilindrą, vamzdį, rutulį ir tuščiavidurį rutulį) bei juos įvairiai tarpusavyje sujungti, galima aprašyti sudėtingus šaltinius. Skaičiuojant apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozes, tai būna patalpa, kurios sienose, lubose ir grindyse yra gamtinės kilmės radionuklidų. Galima aprašyti ir tokias geometrijas, kurios atspindėtų tam tikrą patalpos konstrukcinių detalių su didesniais gamtinės kilmės radionuklidų savitaisiais aktyvumais buvimą. Tai leidžia įvertinti, kokią įtaką apšvitos dozėms gali turėti nedidelės statybinės konstrukcijos, turinčios didesnius, negu aplinkui jas esančios konstrukcijos, gamtinės kilmės radionuklidų savituosius aktyvumus.

Kuriant kambario modelį, galima pasirinkti ir įvairias šaltinio medžiagas – betoną, plytas, medį, įvairias kitas medžiagas. Programa naudoja tam tikrus standartinius šių medžiagų tankius (pavyzdžiui, betono tankis yra $2,35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), tačiau šiuos tankius galima keisti. Galima įvesti ir įvairių medžiagų mišinius. Tai suteikia galimybę realistiškai įvertinti medžiagas, su kuriomis sąveikauja nagrinėjamo šaltinio spinduliuotė.

Aprašant radionuklidus šaltinyje, galima laikyti, jog radionuklidai analizuojamame geometriniame kūne pasiskirstę tolygiai visame tūryje, kad yra vienas radionuklidas ar jų mišinys. Jeigu radionuklidai šaltinyje pasiskirstę netolygiai, tai irgi galima aprašyti, šaltinį apibūdinant kaip tam tikrą skirtingo aktyvumo šaltinių rinkinį, pavyzdžiui, tokį, kuriame šaltiniai išsidėstę sluoksniais. Visa tai leidžia pakankamai realistiškai aprašyti patalpas, kurių konstrukciniuose elementuose yra gamtinės arba dirbtinės kilmės radionuklidų.

Prieš skaičiuojant, nustatomi taškų, kuriuose bus skaičiuojami spinduliuotės srautai, rinkinio (tinklelio) orientacija, vieta ir tankis. Šiame tinklelyje ir yra pavaizduojami skaičiavimo rezultatai (dozės galios pasiskirstymas). Vaizdumo dėlei skaičiavimų rezultatai pavaizduojami grafiškai, tačiau galima nustatyti ir skaitinę dozės galios reikšmę bet kuriame tinklelio taške.

Ši programa skirta optimizuoti radiacinei saugai, kai dirbama su jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniais, todėl ji suteikia ir daugiau galimybių (nustatyti dozes, kurias gaus žmogus, prie šaltinio judėdamas viena ar kita trajektorija, apskaičiuoti dozes, kurias žmogus gaus

esant įvairiems darbo su šaltiniu scenarijams), tačiau analizuojant apšvitą nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės, užtenka apskaičiuoti, koks bus dozės galios pasiskirstymas patalpose ir kokios bus dozės reikšmės.

2.7. Išvados

1. Kadangi darbe analizuoti gamtinės kilmės radionuklidų aktyvumai, o šie radionuklidai pasižymi tuo, kad spinduliuoja įvairių energijų gama fotonus, šių aktyvumų matavimams naudota didelės skiriamosios galios gama spektrometrija.
2. Radono tūrinių aktyvumų patalpose matavimams naudoti E-PERMTM elektretai, pasižymintys tuo, kad jais galima išmatuoti vidutinius radono tūrinius aktyvumus per nustatytą laiko tarpą. Radono tūrinių aktyvumų patalpose kitimams tirti buvo naudojamas radono monitorius su jonizacine kamera, kurio vieno matavimo trukmė yra nuo 10 iki 60 minučių.
3. Dozės galios kitimai buvo matuojami dozės galios monitoriumi su Geigerio–Miulerio skaitikliais. Šiuo monitoriumi atliekamo vieno matavimo trukmė yra iki 2 valandų.
4. Radono tūrinių aktyvumų ir dozės galios monitoriai jais matuojamų parametrų kitimams registruoti buvo naudojami ir todėl, kad jais galima atlikti daug matavimų, o šių matavimų rezultatai registruojami monitorių atmintyje.
5. Apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozėms modeliuoti naudota programa „VISIPLAN-3D“, kuria galima modeliuoti įvairių apšvitos šaltinių geometriją ir radionuklidinę sudėtį.

3. Tyrimų ir modeliavimo rezultatai, jų aptarimas

3.1. Gama spektrometrinių tyrimų rezultatai ir statybinių medžiagų klasifikavimas radiologiniu požiūriu

3.1.1. Radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose

Didelę eksperimentinę darbo dalį sudarė statybinių medžiagų radiologiniai tyrimai, t. y., radionuklidų – gama spindulių – savitųjų aktyvumų jose matavimai. Buvo registruojami gamtinės kilmės radionuklidų ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K savitieji aktyvumai. Iš dirbtinės kilmės radionuklidų kai kuriose statybinėse medžiagose aptikta tik ^{137}Cs . Statybinėse medžiagose yra ir kitų ^{226}Ra ir ^{232}Th skilimo grandinių narių, iš kurių svarbiausi gama spinduliai yra ^{226}Ra skilimo grandinės nariai ^{214}Bi ir ^{214}Pb . Didžiausią įnašą išorinei apšvitai iš ^{232}Th skilimo grandinės tirtų statybinių medžiagų bandiniuose turi ^{228}Ac , ^{212}Pb , ^{208}Tl . Todėl skaičiuojant apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dydį, buvo atsižvelgta į tai, kokie yra ir šių radionuklidų aktyvumai. Šie aktyvumai yra mažesni už ^{226}Ra arba ^{232}Th aktyvumus, kadangi dalis susidariusių radono izotopų (^{222}Rn ir ^{220}Rn), kurie yra dujiniai, išsiskiria į statybinių medžiagų išorę, todėl ir šių radono izotopų skilimo produktai atsiranda statybinių medžiagų išorėje, pavyzdžiui, patalpų ore. Patalpų ore esančio iš statybinių medžiagų atsiradusio ^{222}Rn problema analizuojama atskirai (18A).

Analizuojant statybines medžiagas radiacinės saugos požiūriu, buvo naudotasi ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K savitųjų aktyvumų tyrimų rezultatais (7A). Bendrą šių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės poveikį atspindi aktyvumo rodiklis, kuris apskaičiuojamas atsižvelgiant į visų trijų radionuklidų ir jų radioaktyviųjų šeimų narių, esančių statybinėse medžiagose, jonizuojančiosios spinduliuotės įtaką žmonių apšvitai. Aktyvumo rodiklis duoda galimybę lyginti statybines medžiagas radiacinės saugos požiūriu, nes atskirų radionuklidų savitieji aktyvumai jose skiriasi (16A). Taip išvengiama problemos, kuri iškyla dėl to, kad skirtingi radionuklidai turi skirtingus dozės koeficientus – dydžius, parodančius, kokia apšvitos nuo radionuklido jonizuojančiosios spinduliuotės dozė yra tada, kai šio radionuklido aktyvumas yra vienetinis.

Gama spektrometriškai buvo ištirtas 771 statybinių medžiagų bandinys. Buvo tiriamos mūsų šalyje gaminamos ir naudojamos statybinės medžiagos. Apibendrinti tyrimų rezultatai pateikiami 3.1 lentelėje, kurioje yra radionuklidų savitųjų aktyvumų tirtose statybinėse medžiagose intervalai ir vidurkiai. Statybinės medžiagos sugrupuotos pagal Statybos produkcijos sertifikavimo centro sistemą. Savitieji aktyvumai ir aktyvumo rodikliai pateikiami su 95 % pasikliautinoju intervalu.

3.1 lentelė. Radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose. Vidurkiai pateikiami su 95 % pasikliautinoju intervalu

Statybinių medžiagų pavadinimai	Ištirtų bandinių skaičius	Savituųjų aktyvumų vidurkiai ir intervalai, Bq·kg ⁻¹			Aktyvumo rodiklio vidurkiai ir intervalai
		²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	
Akmens ir marmuro gaminiai	7	37±36 3,5–113	22±19 0,3 – 70	292±06 1,7 – 1150	0,33±0,31 0,01 – 1,08
Asfaltas ir kelio dangos	11	36±9 10 – 75	20±4 11 – 41	654±110 399 – 1030	0,44±0,08 0,30 – 0,80
Betonas, skiedinys, betoniniai ir gelžbetoniniai gaminiai	84	58±30 3,2 – 1030	22±5 1,3 – 110	455±54 12 – 1220	0,45±0,11 0,03 – 3,78
Portlandcementis	141	60±8 4,4 – 465	20±4 2,9 – 211	268±33 1,8 – 1510	0,39±0,04 0,06 – 2,64
Dolomitas	18	12,9±3,0 2,4 – 27	3,6±1,1 0,9 – 8	124±46 11 – 393	0,10±0,03 0,02 – 0,26
Gipsas, gipso kartonas	20	12,6±4,6 1,7 – 38	5,4±5,4 0,6 – 51	111±42 8 – 408	0,11±0,04 0,02 – 0,39
Glaistas	11	16±7 3,1 – 44	4,5±6 0,16 – 31	41±49 2,6 – 286	0,08±0,06 0,01 – 0,40
Granitas, granito skaldos	65	60±13 5 – 296	41±8 2,9 – 142	1103±141 220 – 4690	0,77±0,11 0,13 – 2,78
Kalkės	21	53±19 5 – 110	3,0±0,9 1,2 – 9	54±12 12 – 92	0,21±0,07 0,04 – 0,41
Keraminės (raudonos) plytos ir gaminiai	72	64±8 9 – 215	61±12 7 – 426	1014±63 13 – 1475	0,86±0,06 0,23 – 2,16
Keramzitas	12	90±10 48 – 120	61±5 47 – 76	1180±60 999 – 1320	1,00±0,05 0,90 – 1,10
Klijai	7	24±9 14 – 45	7,2±3 2,0 – 14	134±60 62 – 288	0,16±0,03 0,08 – 0,20
Kreida	6	19±8 0,6 – 27	1,7±1,4 0,5 – 5	30±22 13 – 72	0,08±0,04 0,005 – 0,13
Mediena ir medžio gaminiai	50			24,3±6,5 1,1 – 84	0,009±0,003 0,0004 – 0,03
Silikatinės plytos ir blokeliai	17	21±9 8 – 84	13±6 5 – 60	404±80 228 – 1001	0,27±0,08 0,11 – 0,91
Šlakas	6	152±67 51 – 250	64±21 22 – 90	412±16 375 – 434	0,96±0,29 0,50 – 1,42
Termoizoliacinės medžiagos	18	42±21 2,3 – 186	22±13 0,4 – 115	211±98 1,8 – 625	0,30±0,13 0,01 – 0,79
Tinkas	13	17±6 4 – 30	5,4±2,1 0,6 – 12	134±67 12 – 366	0,12±0,05 0,02 – 0,28
Mineraliniai užpildai (smėlis, žvirgždas, žvirgždo skalda)	192	26,3±1,8 2,4 – 99	15,3±1,3 0,9 – 64	452±22 1,7 – 964	0,31±0,02 0,01 – 0,97

²²⁶Ra ir ²³²Th ir jų skilimo produktų savitieji aktyvumai medienoje yra mažesni už minimalius detektuojamus lygius (atitinkamai, 1,5 ir 1,2 Bq·kg⁻¹). Kai kuriuose mūsų šalies ir įvežtos medienos bandiniuose užfiksuotas ¹³⁷Cs, nors jo savitieji aktyvumai yra maži (16A). Duomenys apie radionuklidų savituosius aktyvumus medienoje pateikti 3.2 lentelėje

3.2 lentelė. Radionuklidų savitieji aktyvumai medienoje. Aktyvumų vidurkiai pateikti su 95 % pasikliautiniu intervalu

Mediena ir jos gaminiai	Ištirtų bandinių skaičius	Savitųjų aktyvumų vidurkiai ir intervalai, Bq·kg ⁻¹	
		⁴⁰ K	¹³⁷ Cs
Įvairių rūšių mediena ir iš jos pagamintos statybinės medžiagos	50	24,3±6,5 1,1 – 84	1,3±0,3 0,1 – 4,0

¹³⁷Cs buvo ir 15 portlandcemenčio bandinių (iš viso ištirta 141 portlandcemenčio bandinys). Bandiniai, kuriuose buvo nustatyta tarša ¹³⁷Cs, buvo paimti iš Baltarusijos gamyklų ir tik 2000 – 2005 metais. Juose ¹³⁷Cs savitasis aktyvumas buvo nuo 0,16 iki 40,0 Bq·kg⁻¹, o aktyvumo vidurkis su 95 % pasikliautiniu intervalu – (7,7±6,4) Bq·kg⁻¹, mediana – 3,1 Bq·kg⁻¹. Skaičiuojant programa VISIPLAN-3D, gauta, kad esant ¹³⁷Cs savitajam aktyvumui 3,1 Bq·kg⁻¹ sugertosios dozės galia dviejų kambarių bute būtų (1,13±0,07) nGy·h⁻¹ (su 95 % pasikliautiniu intervalu) ir sudarytų 0,6 % sugertosios dozės galios vidurkio betoniniuose namuose (išmatavus 324 patalpas).

Tai, kad ¹³⁷Cs buvo užfiksuotas medienos bandiniuose, yra dėsninga. Po Černobylio avarijos ¹³⁷Cs pateko ant medžių, be to, jį iš dirvožemio įsisavina patys medžiai. Kadangi ¹³⁷Cs savitieji aktyvumai medienoje ir jos gaminiuose nedideli, išorinės apšvitos nuo jo spinduliuotės dozė bus irgi nedidelė. Šiame darbe buvo įvertinta apšvitos nuo ¹³⁷Cs spinduliuotės dozė dviejų kambarių standartinio buto modelyje, pastatytame vien iš medienos, kurioje ¹³⁷Cs yra 4,0 Bq·kg⁻¹ – didžiausias medienoje užfiksuotas savitasis aktyvumas. Naudojant modeliavimo programą VISIPLAN-3D, buvo nustatyta, kad sugertosios dozės galios vidurkis būtų (0,83±0,04) nGy·h⁻¹ (su 95 % pasikliautiniu intervalu) nuo 0,77 nGy·h⁻¹ iki 0,93 nGy·h⁻¹. Tai yra 0,8 % sugertosios dozės galios ore vidutinės reikšmės mediniuose namuose (išmatavus 1533 patalpose).

Tai, kad ¹³⁷Cs aptiktas mineralinės kilmės bandiniuose – portlandcementyje – rodo, jog ¹³⁷Cs pateko ir į jų žaliavas. Šios žaliavos yra kasamos iš gilesnių grunto sluoksnių. Žaliavos arba produkcija buvo užteršti grunto paviršiuje esančiu ¹³⁷Cs. Tai leidžia teigti ir toks faktas, kad ¹³⁷Cs portlandcemenčio bandiniuose aptinkamas nuo 2000 metų. ¹³⁷Cs į šiuos bandinius patekti galėjo ir statybinių medžiagų gamybos metu, pavyzdžiui iš ¹³⁷Cs užterštų gamybos įrenginių. Dvi iš trijų Baltarusijos cemento gamyklų, iš kurių buvo pristatyti bandiniai, yra po Černobylio avarijos užterštame regione.

Svarbu yra tai, jog ¹³⁷Cs savitieji aktyvumai visose tirtose statybinėse medžiagose buvo nedideli, todėl apšvitos nuo jo spinduliuotės dozės, palyginus su apšvitos nuo gamtinės kilmės radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozėmis, bus mažos. Analizuoti jas ir į jas atsižvelgti radiacinės saugos požiūriu būtų neoptimalu.

Vienas iš statybinių medžiagų tyrimų tikslų yra aptikti tas medžiagas, kurių naudojimas radiacinės saugos požiūriu yra nepriimtinas, t. y., medžiagas, kuriose yra dideli gamtinės kilmės

radionuklidų savitieji aktyvumai. Pagrindinis kriterijus, nustatant, ar statybinę medžiagą radiacinės saugos požiūriu galima naudoti be apribojimų, yra tai, ar aktyvumo rodiklis, apskaičiuojamas naudojantis (1.4) formule, neviršija 1. Jeigu aktyvumo rodiklis viršija 1, būtina apskaičiuoti, kokia apšvitos nuo tokioje statybinėje medžiagoje esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozė. Nustatyti, ar reikia imtis kokių nors radiacinės saugos priemonių, galima tik remiantis apšvitos dozių įvertimo rezultatais.

Taip pat būtina atkreipti dėmesį ir į tas statybines medžiagas, kurių radionuklidų aktyvumo rodikliai yra artimi 1, nors jo neviršija. Matavimų rezultatų prigimtis yra statistinė, ją apsprendžia radioaktyviojo skilimo proceso tikimybinė prigimtis, neapibrėžtys imant bandinius ir matavimų neapibrėžtis, todėl tikimybė, kad tam tikros statybinių medžiagų rūšies radionuklidų aktyvumo rodiklis viršys 1 net ir tuo atveju, kai atskiros tos rūšies bandinio radionuklidų aktyvumo rodiklis 1 neviršija, nėra lygi nuliui. Tai aptariama 3.2 skyriuje. 3.3 lentelėje pateikiami duomenys apie medžiagas, kurių radionuklidų aktyvumo rodikliai viršijo 1.

3.3 lentelė. Statybinės medžiagos ir statybinė produkcija, kurių radionuklidų aktyvumo rodikliai viršijo 1. Pateikiamos matavimų neapibrėžtys yra su 95 % pasiklioavimo tikimybe

Statybinės medžiagos pavadinimas	Savitasis aktyvumas, Bq·kg ⁻¹			Aktyvumo rodiklis
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	
Keramzitas (4 mm frakcija)	100±13	76±5	1160±203	1,10
Keramikinės degtos plytelės	169±27	56±5	935±123	1,16
Aliuminatinis cementas STRA 40	158±22	131±9	63±11	1,20
Aliuminatinis cementas STRA 50	465±69	211±16	107±28	2,64
Anglies šlakas namų apšiltinimui	243±36	61±52	375±39	1,24
Šlakas	250±32	90±6	414±34	1,42
Frita (keraminių plytelių glazūros sudedamoji dalis)	250±18	43±4	636±156	1,26
Keramikinis santechninis gaminys – praustuvas	215±30	144±10	876±123	1,73
Plytelės	9±2	426±92	13±3	2,16
Kaitrai atsparus šlakbetonis	820±170		720±160	2,97
Kaitrai atsparus šlakbetonis (skirtingos žaliavų gavimo vietos)	1030±210		1040±220	3,78
Granitas (rausvas)	116±17	141±10	1620±227	1,63

Matyti, kad palyginti dideli radionuklidų savitieji aktyvumai yra medžiagose, kuriose yra keramzito, keramikos, šlako, molio, granito. Šie didesni aktyvumai tokiose medžiagose paaiškinami medžiagų sudėties ypatumais.

Keramzito ir keramikos gamybai naudojamas molis, kuris dėl savo fizinių savybių sulaiko gamtinės kilmės radionuklidus. Kai kurių rūšių granite yra palyginti dideli gamtinės kilmės radionuklidų kiekiai, kadangi jie ten atsirado granitui formuojantis. Šlake gamtinės kilmės radionuklidai koncentruojasi degant akmens angliai. Gaminant aluminatinį cementą,

naudojami lengvieji pelenai, kurių sudėtyje būna daug degant susikonglomeravusių kure buvusių gamtinės kilmės radionuklidų.

Galima teigti, kad didelius gamtinės kilmės radionuklidų savituosius aktyvumus statybinėse medžiagose galima numatyti. Tačiau šis teiginys tinka tik kai kurioms statybinėms medžiagoms. Pavyzdžiui, net ne visuose šlako ar šlakinio portlandcemenčio bandiniuose aptinkami dideli gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai (žr. 3.1 lentelę). Taip yra todėl, kad ne visų rūšių akmens anglyje yra daug gamtinės kilmės radionuklidų. Kai kuriuose granituose dėl jų prigimties gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai nėra dideli. Todėl net tas statybines medžiagas, kuriose galimi dideli gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai, būtina tirti.

Dar daugiau klausimų apie tai, kaip prognozuoti radionuklidų savituosius aktyvumus statybinėse medžiagose, iškyla analizuojant tų statybinių medžiagų, kurių radionuklidų aktyvumo rodikliai artimi 1, tyrimų rezultatus. 3.4 lentelėje pateikiami gamtinės kilmės radionuklidų dalyje tokių statybinių medžiagų rezultatai.

3.4 lentelė. Statybinės medžiagos ir statybinė produkcija, kurių radionuklidų aktyvumo rodikliai artimi 1. Pateikiamos matavimų neapibrėžtys yra 95 % pasiklojimo tikimybe

Statybinės medžiagos pavadinimas	Savitasis aktyvumas, Bq·kg ⁻¹			Aktyvumo rodiklis
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	
Akmens masės plytelės	105±24	70±7	1150±92	1,08
Keraminės plytos	129±21	49±4	1122±219	1,05
Keraminės plytos TERRA FAT65-85	63±7	52±2	1355±81	0,92
Keraminės sienų plytelės su šviesiai rožine skysto stiklo glazūra	116±16	53±4	942±7575	0,97
Keraminiai blokai KS20/2+D	88±7	56±2	1073±64	0,93
Keraminiai drenažo vamzdžiai 50	55±12	85±20	1340±260	1,06
Keraminiai drenažo vamzdžiai 70	52±11	77±18	1340±280	1,01
Keraminiai sienų blokai	84±5	55±2	1080±73	0,91
Keraminų plytų šukės	84±24	50±3	1180±168	0,92
Keramzitas	98±15	60±4	1310±113	1,06
Keramzitas iš Roku keramikos	88±14	58±4	1320±95	1,03
Keramzitbetonio blokėliai Fibo 3	94±22	55±3	1084±65	0,95
Keramzitbetonio blokėliai Fibo M3	120±13	67±2	1051±84	1,09
Keramzito smėlis fr.0/5, keramzito žvyras fr.5/10,10/20	90±13	54±4	999±180	0,90
Šamotinio mūro skiedinys	117±18	91±6	284±24	0,94

Kitame gamtinės kilmės radionuklidų galimų savitųjų aktyvumų intervalo gale yra statybinės medžiagos, kuriose gamtinės kilmės radionuklidų yra palyginti nedaug. Šios statybinės medžiagos radiacinės saugos požiūriu svarbios todėl, kad jas tinkamai nustačius, radionuklidų savitųjų aktyvumų tyrimų jose atlikti nebūtina. Tai padėtų optimizuoti statybinių

medžiagų tyrimų apimtis bei strategiją, daugiau dėmesio skiriant toms medžiagoms, kuriose gamtinės kilmės radionuklidų gali būti daug.

Tokių statybinių medžiagų tyrimų rezultatai pateikiami 3.5 lentelėje.

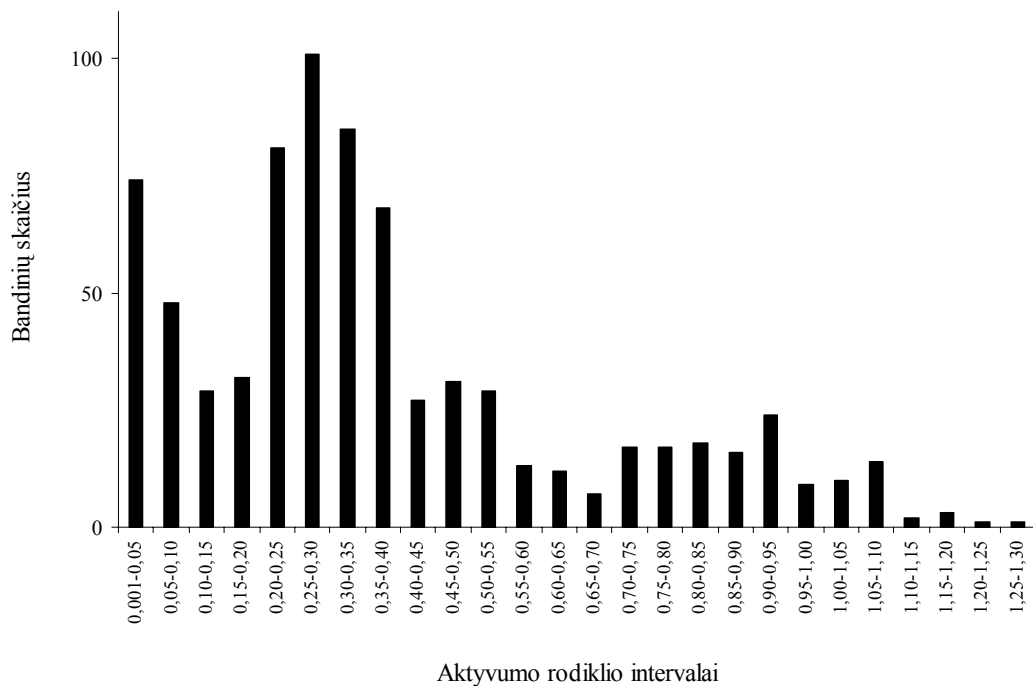
3.5 lentelė. Statybinės medžiagos ir statybinė produkcija, kuriose gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai yra maži. Pateikiamos matavimų neapibrėžtys yra 95 % pasiklioavimo tikimybei

Statybinės medžiagos pavadinimas	Savitasis aktyvumas, Bq·kg ⁻¹				Aktyvumo rodiklis
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	
Beržinė fanera			5,7±4,3	1,9±0,4	0,002
Kreida	0,6±0,2	0,5±0,1	<MDA		0,005
Ažuolinis parketas			19±16	4±1	0,006
Drožlių plokštės			22±3	0,9±0,2	0,007
Kartonas			24±14		0,008
Glaistas ETS2	<MDA	1,7±0,3	2,6±1,1		0,009
Ažuolo parketlentės su faneros pagrindu			27±17	1,6±0,7	0,009
Karjerinis kvarcinis smėlis	1,2	1,9±0,1	2,3±0,7		0,010
Durpės			12±5		0,012
Latentinis glaistas	3,1±0,9	0,16±0,03	3,3±0,6		0,012
Parketlentės			38±16		0,013
Drėgmės izoliatorius (gruntas)	3,0±1,0	0,6±0,3	1,8±1,2		0,014
Marmuro plytelės	3,8±2,0	0,25±0,07	1,7±0,9		0,015

MDA – minimalus matuojamas aktyvumas

Matyti, kad palyginti maži gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai yra nemineralinės kilmės statybinėse medžiagose. Mažais aktyvumais pasižymi ir kvarcinis smėlis. Jis gali būti tinkama žaliava gaminant statybines konstrukcijas ir apdailos medžiagas (naudojamas tinkuoti), kurios naudojamos patalpų, kur turi būti kuo mažesnė apšvitos nuo gama spinduliuotės dozės galia, pavyzdžiui, gama spektrometrijos, individualiosios dozimetrijos laboratorijų, rentgeno filmų saugyklų statybai (1A). Kvarcinis smėlis tokiais atvejais turi pranašumą prieš tokias statybines medžiagas, kaip kreida ar gipsas, nes dėl didelio savo tankio gali apsaugoti ir nuo išorinės (pavyzdžiui, grunto ar kosminės) spinduliuotės. 3.1 paveiksle pateiktas visų tirtų statybinių medžiagų bandinių pasiskirstymas pagal jų radionuklidų aktyvumo rodiklius.

Nors, kaip rodo 3.3 lentelės duomenys, buvo bandinių, kuriuose radionuklidų aktyvumo rodikliai viršijo 2, 3.1 paveiksle pateikiami aktyvumo rodikliai iki 1,30. Taip padaryta siekiant didesnio vaizdumo, nes bandiniai, kuriuose radionuklidų aktyvumo rodikliai viršijo 1,30, sudarė tik 1,5 % viso bandinių skaičiaus. Didžiosios bandinių dalies (79 %) radionuklidų aktyvumo rodikliai neviršijo 0,6.



3.1 pav. Tirtų statybinių medžiagų bandinių pasiskirstymas pagal radionuklidų aktyvumo rodiklius

3.1 paveiksle pateikto pasiskirstymo vienareikšmiškai apibūdinti negalima. Atskiros jo dalys yra logaritminės – normaliosios. Svarbu tai, kad yra mažiausiai du pasiskirstymo maksimumai. Pirmasis (apie 0,05) atsirado dėl ne mineralinės kilmės ir kai kurių mineralinės kilmės statybinių medžiagų, kuriose yra nedideli gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai. Antrasis maksimumas yra dėl kitų statybinių medžiagų. Tam tikras bandinių, kuriuose radionuklidų aktyvumo rodikliai yra nuo 0,75 iki 0,95, skaičiaus padidėjimas yra dėl statybinių medžiagų, kuriose būna dideli gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai. Būtent šios medžiagos yra svarbus statybinių medžiagų kontrolės radiacinės saugos požiūriu objektas – egzistuoja tikimybė, kad kai kuriuose šių statybinių medžiagų bandiniuose gamtinės kilmės radionuklidų bus tiek, kad jų aktyvumo rodikliai viršys 1.

3.1 paveiksle pateiktas pasiskirstymas duoda labai svarbią informaciją apie tai, kokius radionuklidų aktyvumo rodiklius statybines medžiagas klasifikuojant radiologiniu požiūriu, galima laikyti mažais ir kokius – dideliais. Matyti, jog skiriamoji riba tarp dviejų pasiskirstymo maksimumų yra ties aktyvumo rodikliu, lygiu 0,15 – 0,20. Apytiksliai vertinant, esant tokiam aktyvumo rodikliui, apšvitos nuo statybinėje medžiagoje esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės metinė efektinė dozė būtų apie 0,15 mSv. Ši dozė yra apie 15 % vidutinės apšvitos nuo radono patalpose dozės Lietuvoje. Palyginti žema skiriamoji riba pasirinktina dėl būtinybės laikytis radiacinės saugos konservatyvumo principo. Kita tokios skiriamosios ribos pasirinkimo priežastis yra tyrimų rezultatų statistinė prigimtis, dėl kurios būtina turėti tam tikrą atsargą tam atvejui, kai kokios nors statybinės medžiagos radionuklidų aktyvumo rodiklis žymiai viršys šio rodiklio vidurkį rūšiai, kuriai ta medžiaga priklauso.

Pasirinkus tokį „didelių“ ir „mažų“ savitųjų aktyvumų kriterijų ir naudojantis turimais visų statybinių medžiagų tyrimų rezultatais, matyti, jog „maži“ savitieji aktyvumai bus 4 % statybinių medžiagų.

3.1.2. Statybinių medžiagų klasifikavimas radiologiniu požiūriu

Radiologiniu požiūriu klasifikuojant statybines medžiagas ir statybinius gaminius, atsižvelgiama į tai, kokia gali būti apšvitos nuo jose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozė. Ji priklauso nuo savitųjų radionuklidų aktyvumų statybinėse medžiagose, šių medžiagų kiekio, naudojamo patalpų statybai, ir jų atstumo iki švitinamų žmonių.

Kriterijai, kuriais remiantis buvo nustatytas statybinių medžiagų skirstymas pagal pirmąjį požymį, t. y., radionuklidų savituosius aktyvumus (aktyvumo rodiklį), aptarti 3.1 skyriuje. 3.6 lentelėje pateiktos įvairios statybinių medžiagų rūšys, išdėstytos abėcėlės tvarka dviem grupėmis – su aktyvumo rodikliais, lygiais 0,15 ir mažesniais bei su aktyvumo rodikliais, viršijančiais 0,15.

Prieš tai išanalizuotas statybinių medžiagų pasiskirstymas pagal aktyvumo rodiklį ir nustatytas grupavimo kriterijus padeda pakankamai tiksliai statybines medžiagas apibūdinti galimų radionuklidų aktyvumų jose požiūriu. Matyti, kad tokios statybinės medžiagos, kaip, pavyzdžiui, dažai, gipsas ir gipso kartonas, glaistas, grindų danga, mediena visada priskirtini pirmajai – medžiagų, kuriose radionuklidų savitieji aktyvumai yra maži, grupei. Taip pat neaptikta nė vieno asfalto, keramikos, keramzito, šlako bandinio, kurio radionuklidų aktyvumo rodikliai būtų lygūs arba mažesni už 0,15. Todėl pastarosios statybinės medžiagos be jokių išlygų priskirtinos antrajai – statybinių medžiagų, kuriose radionuklidų savitieji aktyvumai yra dideli, grupei. Daugiausia problemų grupuojant pagal aktyvumo rodiklį kelia tos medžiagos, kurių vidutiniai radionuklidų aktyvumo rodikliai gali būti ir didesni, ir mažesni už 0,15. Taip yra todėl, kad tokių statybinių medžiagų, kaip akmuo, betonas, dolomitas, kalkės ir pan. yra daug ir įvairių. Atskiri šių statybinių medžiagų bandiniai skiriasi savo žaliavomis ir gamybos būdu. Laikantis radiacinės saugos konservatyvumo principo, klasifikuojant radiacinės saugos požiūriu, tokias medžiagas reikia priskirti grupei, kurioje yra didesnę aktyvumo rodiklį turinčios medžiagos.

3.6 lentelė. Statybinių medžiagų rūšių išskaidymas pagal pirmąjį jų klasifikavimo radiologiniu požyriu požymį – radionuklidų aktyvumo rodiklį

Statybinių medžiagų rūšių pavadinimai	Aktyvumo rodiklio vidurkis su 95 % pasikliautinoju intervalu	Bandinių skaičius
Vidutinis aktyvumo rodiklis I mažesnis už 0,15		
Akmuo, marmuras	0,07±0,06	4
Betonas	0,08±0,05	6
Dolomitas	0,09±0,02	16
Gipsas	0,08±0,02	17
Glaistas	0,05±0,02	11
Kalkės	0,07±0,02	11
Klijai	0,13±0,05	3
Kreida	0,08±0,04	6
Mediena	0,008±0,003	50
Portlandcementis	0,10±0,02	10
Silikatinės plytos	0,13±0,04	2
Termoizoliacinės medžiagos	0,05±0,02	7
Tinkas	0,07±0,02	9
Užpildai	0,050±0,02	11
Vidutinis aktyvumo rodiklis I didesnis už 0,15		
Akmuo	0,7±0,5	3
Asfaltas	0,44±0,08	11
Betonas	0,48±0,12	78
Dolomitas	0,21±0,09	2
Gipsas	0,31±0,14	3
Granitas	0,75±0,09	65
Kalkės	0,36±0,02	10
Keraminės plytos ir keraminiai gaminiai	0,86±0,06	72
Keramzitas	1,00±0,05	12
Klijai	0,18±0,02	4
Mineraliniai užpildai (smėlis, žvirgždas, žvirgždo skalda)	0,33±0,02	181
Portlandcementis	0,41±0,04	131
Silikatinės plytos	0,29±0,09	15
Šlakas	0,96±0,29	6
Termoizoliacinės medžiagos	0,47±0,13	11
Tinkas	0,24±0,03	4

Kitas statybinių medžiagų klasifikavimo radiologiniu požyriu požymis yra jų kiekis, naudojamas statybose. 3.7 lentelėje pateikta informacija apie statybinių medžiagų paskirstymą remiantis šiuo požyriu.

3.7 lentelė. Statybinių medžiagų rūšių paskirstymas pagal antrąją jų klasifikavimo radiologiniu požimių – naudojamą kiekį

Statybinių medžiagų rūšių pavadinimai	Bandinių skaičius
Naudojamas kiekis – mažiau už 10 %	
Gipsas	20
Glaistas	11
Kalkės	21
Klijai	7
Kreida	6
Šamotinės plytos	2
Termoizoliacinės medžiagos	18
Tinkas	13
Naudojamas kiekis – daugiau už 10 %	
Akmuo ir marmuras	7
Asfaltas ir kelio dangos	11
Betonai	84
Dolomitas	18
Granitas	65
Keraminės plytos ir keraminiai gaminiai	70
Keramzitas	12
Mediena	50
Mineraliniai užpildai (smėlis, žvirgždas, žvirgždo skalda)	192
Portlandcementis	141
Silikatinės plytos	17
Šlakas	6

Trečiasis statybinių medžiagų klasifikavimo požymis yra jų atstumas nuo vietų, kur nuolat būna žmonės, t. y., patalpų vidaus erdvės. Informacija apie tai, kaip statybinių medžiagų klasifikavimui buvo panaudotas šis požymis, pateikta 3.8 lentelėje. Kartu pateikiama ir informacija apie įvairiose ribose naudojamų statybinių medžiagų radionuklidų aktyvumo rodiklius

3.8 lentelė. Statybinių medžiagų paskirstymas pagal trečiąją požymį – atstumą nuo vietų, kur nuolat būna žmonės

Naudojimo vieta	Bandinių skaičius	Aktyvumo rodiklio vidurkis	Aktyvumo rodiklio mediana	Aktyvumo rodiklio intervalas
Namo statybai, vidaus ir išorės apdailai	459	0,39	0,29	0,0004 – 2,64
Gatvių, aikščių statybai, aplinkos tvarkymui, landšafto formavimui	125	0,62	0,49	0,01 – 1,92
Naudojama ir pastatų statybai, ir aplinkos tvarkymui	187	0,31	0,31	0,01 – 0,73

Kai kurios statybinės medžiagos, tokios, kaip mineraliniai užpildai, betonas, naudojamos ne tik pastatų statybai ir apdailai, bet ir aplinkos tvarkymui. Tokios statybinės medžiagos, remiantis radiacinės saugos konservatyvumo principu, įtrauktos į statybinių medžiagų, esančių mažu atstumu nuo žmogaus nuolatinio buvimo vietų, klasę.

Gali kilti klausimas, ar statybinių medžiagų klasifikavimo radiologiniu požiūriu požymiai nėra tarpusavyje susiję, pavyzdžiui, ar mažais kiekiais naudojamos statybinės medžiagos nepasižymi tam tikrais radionuklidų savitaisiais aktyvumais. 3.9 lentelėje palyginti aktyvumo rodikliai atskirose grupėse, apibūdintose naudojamu statybinių medžiagų kiekiu.

Atlikus t-testą tarp aktyvumo rodiklio vidurkių statybinių medžiagų, priskirtų skirtingoms grupėms pagal antrąjį požymį (naudojamą kiekį, žr. 3.7 lentelę), nustatyta, kad statistiškai patikimas skirtumas yra ($p < 0,01$).

3.9 lentelė. Statybinių medžiagų, naudojamų įvairiais kiekiais, tyrimų rezultatai

Naudojamas kiekis	Bandinių skaičius	Aktyvumo rodiklio vidurkis	Aktyvumo rodiklio mediana	Aktyvumo rodiklio intervalas
>10 %	673	0,44	0,34	0,02 – 2,64
<10 %	98	0,24	0,10	0,005 – 3,78

Radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose daugiausia priklauso nuo medžiagų gamybai naudojamų žaliavų, o jų naudojami kiekiai – nuo paskirties. Tačiau matyti, kad nedideliais kiekiais naudojamos tokios statybinės medžiagos, kaip dažai, glaistas, kalkės, klintys, stiklas, tapetai, o šiose statybinėse medžiagose yra nedideli gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai. Tuo ir galima paaiškinti statistiškai patikimą skirtumą tarp dideliais ir mažais kiekiais naudojamų medžiagų radionuklidų aktyvumo rodiklių.

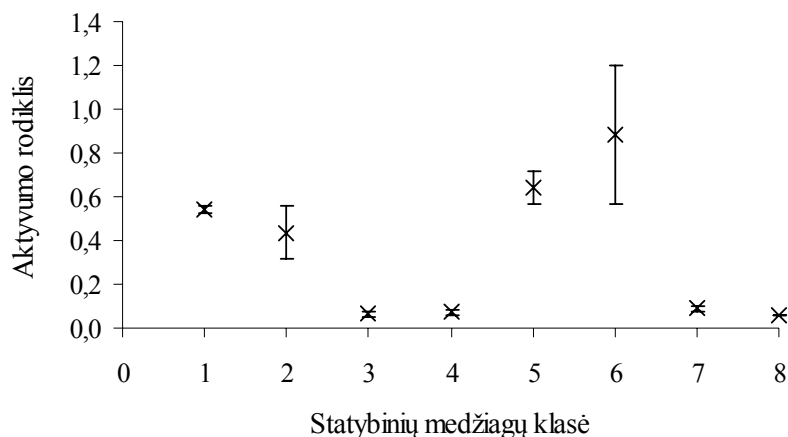
Klasifikuojant atsižvelgiama į visus tris požymius. Net jeigu jie visi arba kurie nors du būtų tarpusavyje susiję, klasifikavimui tai neturėtų reikšmės, nes kiekvienas faktorius naudojamas nepriklausomai nuo kitų.

Svarbiausias požymis šioje klasifikacijoje yra pirmasis – radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose. Todėl svarbu žinoti, kaip šie aktyvumai pasiskirstę skirtingose statybinių medžiagų klasėse. Informacija apie tai pateikta 3.10 lentelėje. Kiekvienos klasės apibūdinimai pagal naudotus požymius pateikti 2.1 skyriuje.

3.10 lentelė. Statybinių medžiagų klasės (apibūdinimas pateiktas 2.1 lentelėje) ir gamtinės kilmės radionuklidų savitųjų aktyvumų bei aktyvumo rodiklių intervalai

Klasės	Statybinės medžiagos pavadinimas	Savitųjų aktyvumų intervalai, Bq·kg ⁻¹				Aktyvumo rodiklio intervalai
		²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	
1	Betonas, gelžbetonis, mineraliniai užpildai, plytos, blokeliai, akmuo, cementas,	6 – 1030	0,6 – 426	13 – 1475	0,14 – 37	0,16 – 3,78
2	Betono paviršiaus kietikliai, cementiniai klėjai	4 – 250	3 – 115	47 – 1510		0,16 – 1,26
3	Mediena, gipsas, tinkas, marmuras, glaistas, gipso kartonas	1,4 – 30	0,1 – 8,8	1,1 – 221	0,36 – 4	0,0004 – 0,15
4	Stiklas, kalkės, tapetai	0,6 – 29	0,5 – 17	2,3 – 240		0,005 – 0,15
5	Granito ir žvirgždo skaldos, asfaltas	5 – 292	3 – 141	84 – 2050		0,16 – 1,92
6	Betoniniai vejos, gatvių borteliai, apvada, aplinkos tvarkymo elementai	23 – 186	13 – 55	333 – 667		0,25 – 0,78
7	Dolomitas, dolomito skaldos	2,4 – 22	0,6 – 7	1,8 – 227		0,01 – 0,15
8	Vamzdynų izoliacinės medžiagos	4 – 9	0,1 – 0,4	54 – 68		0,03 – 0,05

Tai, kad į 3, 4, 7 ir 8 klases pateko statybinės medžiagos, pasižyminčios mažais radionuklidų savitaisiais aktyvumais, rodo ir 3.2 paveiksle.



3.2 pav. Įvairioms statybinių medžiagų klasėms priklausančių statybinių medžiagų radionuklidų aktyvumų rodiklių vidurkiai su 95 % pasikliautinoju intervalu

Taip klasifikuojant, visada galimi tam tikri netikslumai, ypač klasifikuojant statybines medžiagas, kurias pagal analizuojamą požymį galima priskirti tiek vienai, tiek kitai klasei. Tačiau tokie netikslumai lemiamo vaidmens vertinant apšvitą nuo statybinių medžiagų neturėtų vaidinti. Tam yra kelios priežastys.

Pirma, klasifikuojant remtasi radiacinės saugos konservatyvumo principu, teigiančiu, jog tais atvejais, kai vertinant apšvitą dėl informacijos trūkumo ar kitokių priežasčių gali atsirasti neapibrėžtumai, turi būti pasirenkamas nepalankiausias vertinimo scenarijus. Gavus daugiau informacijos, šį scenarijų galima pakeisti labiau realistišku.

Antra, egzistuoja tikimybė, kad neapibrėžtumai, atsiradę skirstant statybines medžiagas pagal atskirus požymius, sudarant statybinių medžiagų klases vienas kitą panaikins.

Trečia, yra daug informacijos apie svarbiausią statybinių medžiagų klasifikacijos požymį – radionuklidų savituosius aktyvumus jose (aktyvumo rodiklį), ir visa ši informacija panaudota nustatant skirstymo pagal šį požymį kriterijų ir skirstant statybines medžiagas.

Ketvirta, ši klasifikacija nebus galutinis statybinių medžiagų tinkamumo radiacinės saugos požiūriu kriterijus. Tokios klasifikacijos paskirtis – nustatyti galimą apšvitą nuo vienos ar kitos rūšies statybinių medžiagų ir išskirstyti statybines medžiagas pagal jų radiologinių tyrimų prioritetus.

Iš pateiktos klasifikacijos galima nustatyti statybinių medžiagų radiologinių tyrimų prioritetus – identifikuoti medžiagas, kurias reikia tirti pirmiausiai ir detalčiausiai. Jie pateikti 3.11 lentelėje. Prioritetai buvo nustatyti analizuojant, kokią dalį bendrame ištirtų bandinių skaičiuje sudarė vienos ar kitos statybinės medžiagos.

3.11 lentelė. Statybinių medžiagų radiologinių tyrimų prioritetai

Tyrimų prioritetas	Statybinės medžiagos	Galimos tyrimų apimtys, %
Aukštas	Cementai, betonai, gelžbetonis, mineraliniai užpildai, plytos, blokeliai, akmuo, granito ir žvirgždo skaldos, asfaltas	75
Vidutinis	Betono paviršiaus kietikliai, cementiniai klijai, betoniniai vejos, gatvių borteliai, apvadai, aplinkos tvarkymo elementai,	7
Žemas	Mediena, gipsas, tinkas, marmuras, glaistas, gipso kartonas, stiklas, kalkės, tapetai, dolomitas, dolomito skaldos, vamzdinių izoliacinės medžiagos	18

Nustatant galimą bandinių dalį, remtasi šiame darbe atliktų tyrimų statistika – įvairių statybinių medžiagų bandinių skaičiais. Dėl didelio atliktų tyrimų skaičiaus šis įvertinimas atspindi esamą padėtį. Būtina žinoti, kad ši padėtis atsirandant naujoms technologijoms gali kisti. Tačiau net gaminamų vieno ar kito rūšių statybinių medžiagų kiekiai negali atspindėti galimų tyrimų apimčių, nes galimi tyrimų skaičiai priklauso ne tik nuo pagamintos medžiagos kiekio, bet ir jos žaliavų bei technologinių procesų vienodumo, net nuo gamintojų ir tiekėjų nuostatų –

kai kurie iš jų yra labai jautrūs savo produkcijos ar prekių kokybei, todėl atlieka daug tyrimų. Todėl šioje lentelėje pateikiama informacija apie galimus tyrimų skaičius yra orientacinio pobūdžio.

3.2. Statistinė statybinių medžiagų gama spektrometrinių tyrimų rezultatų analizė

Išvados apie statybinių medžiagų tinkamumą radiacinės saugos požiūriu daromos atlikus vieno bandinio gama spektrometrinį tyrimą. Netgi nurodžius A tipo matavimo neapibrėžtį (šiuose darbe įvertintos ir pateiktos tiek A, tiek B tipo neapibrėžtys), kurią nulemia tokie faktoriai, kaip neapibrėžtis kalibruojant gama spektrometrą, nustatant bandinio masę, atimant foniniame gama spektre esančias smailes ir pan., klausimas apie tai, kokias reikšmes gali įgyti tos pačios partijos bandiniuose arba net tame pačiame bandinyje (tomis pačiomis sąlygomis jį analizuojant daugiau kaip vieną kartą) esančių radionuklidų savitieji aktyvumai, lieka neaiškus. Bandinyje esančių radionuklidų savituosius aktyvumus matuojant vieną kartą, lieka neaišku, kokio dydžio yra B tipo neapibrėžtis, o matuojant tik viename partijos bandinyje esančių radionuklidų aktyvumus, lieka neaišku, koks yra partijos nehomogeniškumas radionuklidų savitųjų aktyvumų požiūriu, t. y., kaip vieno ar kelių tos partijos bandinių tyrimų rezultatai gali būti taikomi visai partijai apibūdinti.

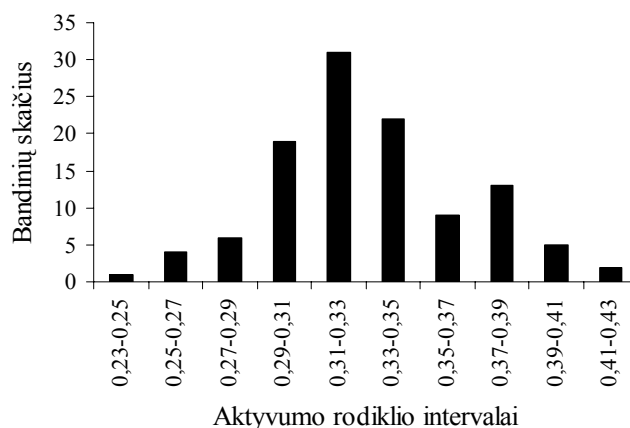
Ši problema yra ypatingai svarbi tada, kai radionuklidų savitieji aktyvumai yra artimi lygiams, kuriuos viršijus būtina atlikti detalius apšvitos nuo medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozių įvertinimus. Tokiais atvejais egzistuoja tam tikra nuo radionuklidų savitųjų aktyvumų ir jų standartinių nuokrypių priklausanti tikimybė, kad tam tikro bandinių tyrimų skaičiaus arba net tam tikro to paties bandinio tyrimų skaičiaus rezultatai viršys minėtus lygius, nuo kurių reikia atlikti detalius dozių įvertinimus.

Atsakyti į šiuos klausimus galima tik atlikus tam tikrą tos pačios partijos bandiniuose ir tame pačiame bandinyje esančių radionuklidų savitųjų aktyvumų matavimų skaičių. Tačiau techniškai taip padaryti nėra įmanoma – žymiai padidėtų tyrimų skaičiai. Būtina turėti informaciją, kuri padėtų įvertinti, kokių šio tipo neapibrėžties reikšmių galima tikėtis, ir remiantis šia informacija nustatyti, kokiems radionuklidų savitiesiems aktyvumams (lyginant su lygiais, kuriuos viršijus būtina detaliai įvertinti apšvitos nuo šių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozes) esant, reikia atlikti daugiau kaip vieną to paties bandinio arba tos pačios partijos tyrimą.

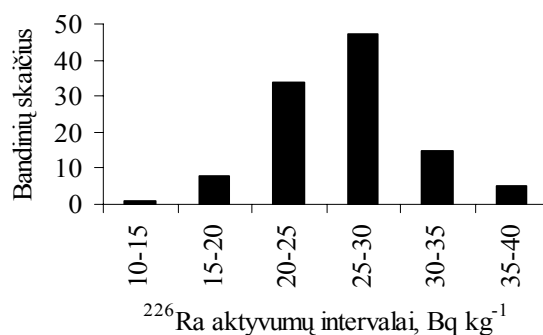
Šiame skyriuje aptariami rezultatai, gauti atliekant tos pačios partijos bandinių, skirtingų to paties bandinio mėginių ir to paties mėginio tomis pačiomis sąlygomis tyrimus. Partija laikoma statybinės medžiagos, pagamintos iš toje pačioje vietoje paimtų žaliavų naudojant tą pačią technologiją. Bandinys yra tiriamos medžiagos dalis, paimta tyrimui. Mėginys yra

bandinio dalis, paruošta tyrimams. Dažnai bandinys ir mėginys apibūdina tą patį objektą, tačiau kartais, ypač tada, kai bandinys skaidomas į keletą dalių ir kiekviena šių dalių yra tirama, šios sąvokos apibūdina skirtingus objektus.

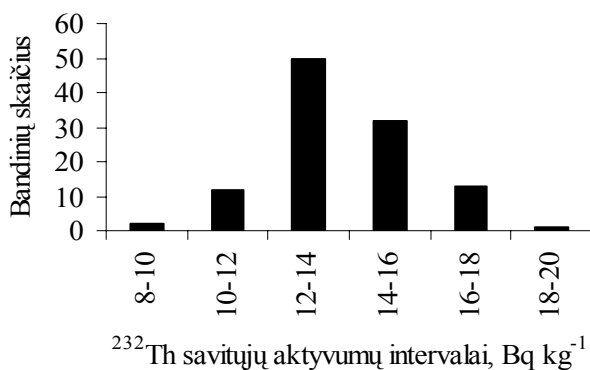
3.3 – 3.6 paveiksluose pateikiami aktyvumo rodiklio ir radionuklidų savitųjų aktyvumų tyrimų rezultatai, gauti matuojant radionuklidų savituosius aktyvumus smėlio – žvyro bandiniuose, paimtuose Senujų Trakų karjere. Bandiniai buvo imami per visą karjero ilgį kas 1 – 2 metrus (112 bandiniai).



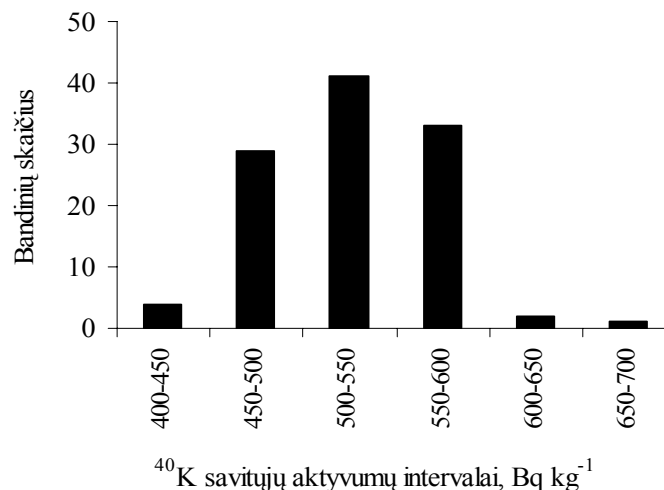
3.3 pav. Aktyvumo rodiklio karjerinio smėlio – žvyro žaliavos bandiniuose iš Senujų Trakų karjero pasiskirstymas.



3.4 pav. ²²⁶Ra savitojo aktyvumo smėlio ir žvyro bandiniuose iš Senujų Trakų karjero pasiskirstymas



3.5 pav. ²³²Th savitojo aktyvumo karjerinio smėlio – žvyro žaliavos bandiniuose iš Senujų Trakų karjero pasiskirstymas



3.6 pav. ^{40}K savitojo aktyvumo karjerinio smėlio – žvyro žaliavos bandiniuose iš Senujų Trakų karjero pasiskirstymas

Nustatyta, kad šių bandinių radionuklidų aktyvumo rodiklio vidurkis yra 0,34 , standartinis nuokrypis – 0,04.

Iš 3.3 – 3.6 paveikslų matyti, kad pasiskirstymai yra normalieji, o jų formos panašios įvairiems radionuklidams. Standartinių nuokrypių reikšmės yra nuo 0,07 iki 0,32 vidurkio reikšmės. Medianos ir vidurkiai yra artimi (jų santykiai yra nuo 0,98 iki 1,03), todėl galima teigti, jog šie pasiskirstymai yra simetriški.

Taip pat buvo atlikti iš šio karjero smėlio – žvyro žaliavos pagamintos statybinės produkcijos tyrimai. Buvo paimti visų rūšių Senujų Trakų karjero smėlio – žvyro žaliavos gaminamų produktų bandiniai. Buvo atlikti visų frakcijų smėlio, žvyro ir žvyro skaldos bei žvyro ir žvyro skaldos mišinio tyrimai. Ištirta 18 bandinių. Tyrimų rezultatai pateikti 3.12 lentelėje.

3.12 lentelė. Senujų Trakų karjero smėlio – žvyro žaliavos gaminamų produktų bandinių tyrimų rezultatai

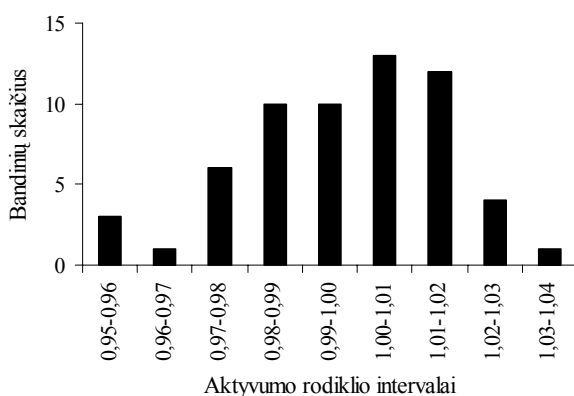
Parametras	Savitasis aktyvumas, Bq·kg ⁻¹			Aktyvumo rodiklis
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	
Vidurkis su 95 % pasikliautinoju intervalu	35±4	22±3	553±45	0,41±0,04
Mediana	35	22	533	0,40
Reikšmių intervalas	16 – 47	12 – 38	367 – 830	0,28 – 0,61

Iš duomenų, pateiktų 3.12 lentelėje, matyti, kad ir šių bandinių radionuklidų aktyvumo rodiklio ir visų radionuklidų savitųjų aktyvumų pasiskirstymai yra simetriški (skirtumai tarp vidurkių ir medianų yra maži), o standartiniai nuokrypiai yra apie 0,22 vidurkio reikšmės. Tai rodo, kad skirstant tirto karjero žaliavą į skirtingas frakcijas, radionuklidai frakcijose pasiskirsto tolygiai, o tai leidžia teigti, kad karjero žaliava radionuklidų savitųjų aktyvumų požiūriu yra gana vienalytė. Tai turėtų galioti ir daugumai kitų statybinės žaliavos šaltinių, išskyrus tuos atvejus,

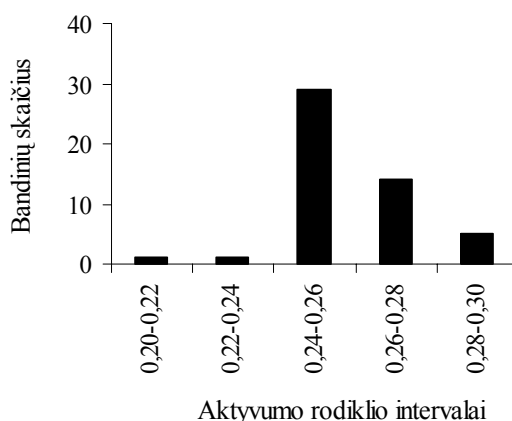
kai pirminė (į frakcijas neišskirstyta) žaliava sudaryta iš dalių, kuriose radionuklidų aktyvumai kuriose žymiai skiriasi. Tokios žaliavos pavyzdys galėtų būti smėlis su granito priemaišomis.

Tai yra svarbu atliekant statybinių medžiagų žaliavų tyrimus. Siekiant tyrimus optimizuoti, daugeliu atvejų galima atlikti visų frakcijų tyrimus vienu metu. Tačiau tokie tyrimai neturėtų būti atliekami tada, kai mišinyje yra didelių radionuklidų savituosius aktyvumus turinčių priemaišų (ypač, kai tų priemaišų dalis mišinyje yra nedidelė) arba kai mišinio radionuklidų aktyvumo rodiklis yra artimas 1. Tokiais atvejais reikėtų atlikti atskirų frakcijų tyrimus siekiant nustatyti, kuriose mišinio sudedamosiose dalyse (frakcijose) radionuklidų savitieji aktyvumai yra didžiausi.

Kaip matyti iš 3.3 paveiklo, statybinių medžiagų žaliavų bandinių radionuklidų aktyvumo rodikliai yra skirtingi, kai tie bandiniai paimti iš tos pačios vietos (karjero). Šiuos rezultatus galima palyginti su tos pačios statybinės medžiagos pusfabrikačio ir gatavos produkcijos partijos bandinių radionuklidų aktyvumo rodiklių tyrimų rezultatais. Skirtingų tos pačios partijos statybinės produkcijos bandinių tyrimų rezultatai pateikti 3.7 ir 3.8 paveikluose.



3.7 pav. Aktyvumo rodiklio keraminių plytų bandiniuose iš „Tauragės keramikos“ pasiskirstymas



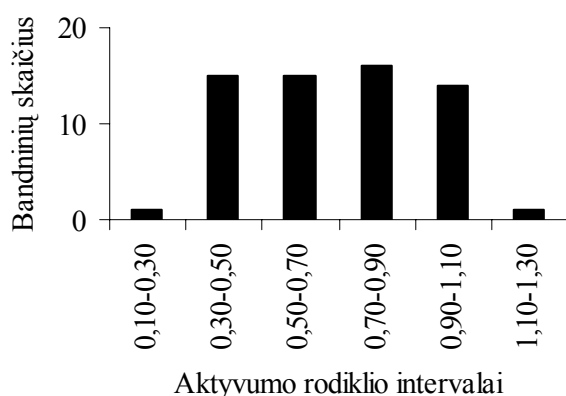
3.8 pav. Statybinio gaminio (silikatinių plytų) pusfabrikačio („Vilniaus silikatas“) radionuklidų aktyvumo rodiklio pasiskirstymas

Nors statybinės produkcijos ir pusfabrikačių bandiniai imti skirtingose statybinių medžiagų gamyklose, pateikti pasiskirstymai duoda galimybę įvertinti, kaip radionuklidų

savitieji aktyvumai pasiskirsto įvairiose statybinėse medžiagose. Matyti, kad abu pasiskirstymai yra netaisyklingi, juos lyginant su normaliuoju pasiskirstymu. Keraminių plytų bandiniuose užfiksuoti dideli radionuklidų savitieji aktyvumai – aktyvumo rodikliai yra artimi 1 ir jį viršija, be to, mažesnius už vidurkį aktyvumo rodiklius turi daugiau bandinių negu aktyvumo rodiklius, didesnius už vidurkį (pasiskirstymas yra platus). Tuo tarpu, silikatinių plytų pusfabrikačių radionuklidų aktyvumo rodikliai palyginti maži, o didesnių už vidurkį reikšmių aktyvumo rodiklio reikšmių yra daugiau negu mažesnių. Tai ir nulėmė tokias pasiskirstymo formas.

Tai svarbu nustatant tikimybę, kad statybinių medžiagų partijos aktyvumo rodiklis viršys 1, net jeigu šios partijos bandinio (ar keleto bandinių) matavimais nustatytas aktyvumo rodiklis yra mažesnis už 1. Tokio matavimo (matavimų) metu standartinis nuokrypis skaičiuojamas simetriškam normaliajam pasiskirstymui, neatsižvelgiant į tai, jog aktyvumo rodikliui esant artimam 1, už vidurkį didesnių aktyvumo rodiklio reikšmių yra mažiau, negu reikšmių, mažesnių už vidurkį. Todėl tikimybė, kad aktyvumo rodiklis viršys 1 šio rodiklio vidurkiui artėjant prie 1, yra mažesnė, negu žemiau įvertinta tikimybė, o tai atitinka radiacinės saugos konservatyvumo principą, pagal kurį parametrai, turintys reikšmės apšvitės dozėms, turi būti įvertinami su atsarga. Pastaruoju atveju su atsarga įvertinama tikimybė, kad aktyvumo rodiklis viršys 1, tuo pačiu ir būtinybė atlikti detalesnius galimų apšvitės nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozių tyrimus.

Nuo 1998 metų atliekami granito skaldos bandinių iš Mikaševičių karjero (Baltarusija) tyrimai. Buvo ištirti 62 bandiniai – žaliavos 16 ir 32 mm frakcijos ir iš jos pagamintų įvairių frakcijų granito bandiniai. 3.9 paveiksle pateiktas šių bandinių radionuklidų aktyvumo rodiklio pasiskirstymas.

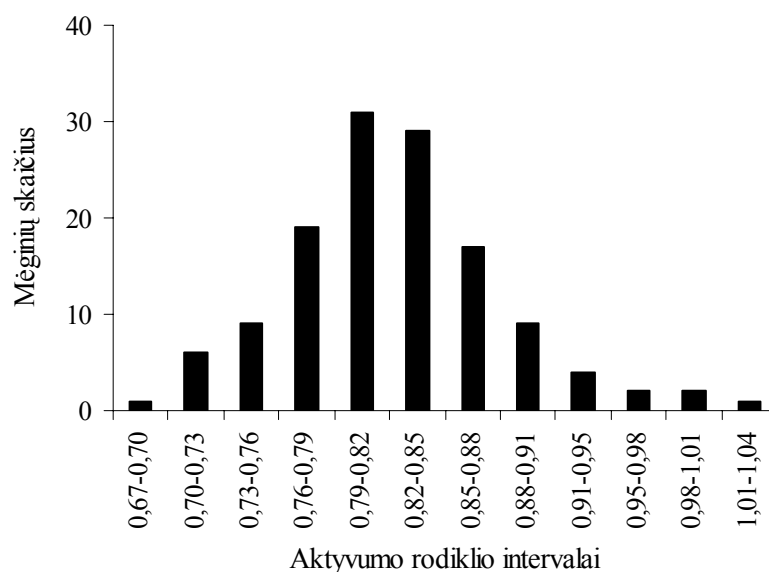


3.9 pav. Granito bandinių iš Mikaševičių karjero radionuklidų aktyvumo rodiklio pasiskirstymas

Matyti, kad šis pasiskirstymas yra pakankamai taisyklingas (artimas normaliajam), o jo forma panaši į formą, pateiktą 3.3 paveiksle (karjerinio smėlio – žvyro žaliavos bandinių iš Senųjų Trakų karjero). Skirtumas yra tas, kad granito bandinių iš Mikaševičių radionuklidų aktyvumo rodiklio reikšmių, didesnių už vidurkį, yra daugiau negu reikšmių, mažesnių už

vidurkį. Šis faktas rodo, kad aktyvumo rodiklių pasiskirstymo formos priklauso nuo analizuojamų statybinių medžiagų. Kadangi visais atvejais šie pasiskirstymai yra pakankamai artimi normaliesiems, remiantis normaliuoju pasiskirstymu gauti standartiniai nuokrypiai atspindi galimus aktyvumo rodiklio reikšmių intervalus.

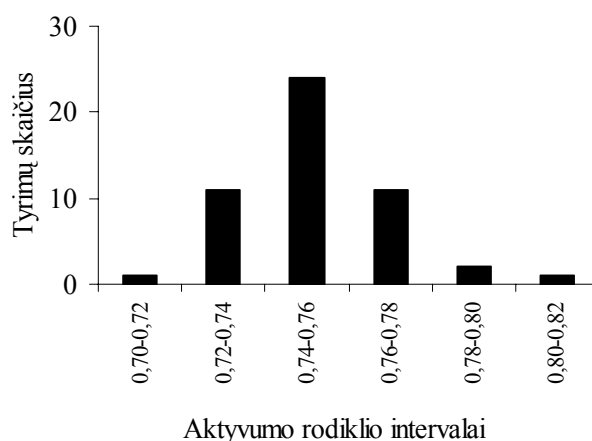
Svarbus tyrimų rezultatų patikimumo rodiklis yra to paties bandinio skirtingų mėginių tyrimų rezultatai. Tam bandinys buvo padalintas į 130 mėginių ir atlikti jų tyrimai. Šių tyrimų rezultatai pateikti 3.10 paveiksle.



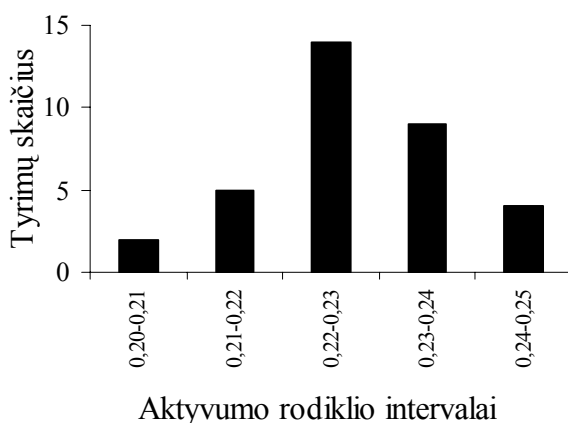
3.10 pav. Keraminių plytų iš Daugėlių plytinės bandinio mėginių radionuklidų aktyvumo rodiklio pasiskirstymas

3.10 paveiksle pateiktas pasiskirstymas yra simetriškas – mediana yra 0,824, vidurkis – 0,828.

Kitas svarbus matavimų kokybės parametras yra to paties mėginio tyrimų tomis pačiomis sąlygomis rezultatai. Statybinių medžiagų žaliavų ir statybinių gaminių mėginių tokių tyrimų metu gautų aktyvumo rodiklio pasiskirstymai pateikti 3.11 – 3.12 paveiksluose.



3.11 pav. Molio mėginio iš „Rokų keramikos“ tyrimų metu gautas aktyvumo rodiklio pasiskirstymas



3.12 pav. Smėlio iš Kunigiškių karjero mėginio tyrimų metu gautas aktyvumo rodiklio pasiskirstymas

3.3, 3.7, 3.8 ir 3.10 – 3.12 paveiksluose pateikti rezultatai rodo, kaip pasiskirsto aktyvumo rodiklio reikšmės:

- statybinių medžiagų žaliavų bandiniams iš to paties karjero (3.3 paveikslas),
- gatavos statybinės produkcijos bandiniams iš tos pačios statybinių gaminių partijos (3.7 paveikslas),
- pusfabrikačių bandiniams iš tos pačios pusfabrikačių partijos (3.8 paveikslas),
- mėginiams iš to paties bandinio (3.10 paveikslas),
- to paties mėginio tyrimams tomis pačiomis sąlygomis (3.11 ir 3.12 paveikslai).

Iš pateiktų pasiskirstymų matyti, kad net to paties mėginio tyrimų tomis pačiomis sąlygomis rezultatai turi tam tikrą sklaidą, nekalbant apie rezultatus, gautus tiriant tos pačios statybinių medžiagų partijos bandinius.

Galima įvertinti tikimybę, kad ištirtos statybinės medžiagos aktyvumo rodiklis viršys 1 – reikšmę, kurią viršijus būtina įvertinti apšvitos nuo medžiagoje esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozę. Ši tikimybė priklauso nuo tyrimo metu gautos aktyvumo rodiklio reikšmės, todėl 3.13 lentelėje, kur pateikiami tokio įvertinimo rezultatai, jie pateikiami įvairioms aktyvumo rodiklio reikšmėms.

Šios tikimybės įvertinimo programa pateikiama adresu http://www.math.csusb.edu/faculty/stanton/m262/normal_distribution/normal_distribution.html.

Įvertinant buvo laikoma, kad pasiskirstymas yra normalusis, ir naudojamos aptartų tyrimų metu gautais standartiniais nuokrypiais.

Matyti, kad aktyvumo rodikliui artėjant prie 1, didėja tikimybė, kad toje pačioje partijoje bus bandinys arba tame pačiame bandinyje – mėginys, kurio aktyvumo rodiklis viršys 1.

3.13 lentelė. Tikimybės, kad tirtų statybinių medžiagų aktyvumo rodiklis viršys 1

Tyrimo metu nustatyta aktyvumo rodiklio reikšmė	Tiriant vieną bandinį iš statybinių medžiagų partijos – tikimybė, kad bet kurio bandinio iš partijos aktyvumo rodiklis viršys 1	Tiriant vieną mėginį iš statybinių medžiagų bandinio – tikimybė, kad bet kurio mėginio iš bandinio aktyvumo rodiklis viršys 1	Vieną kartą tiriant mėginį – tikimybė, kad to paties mėginio aktyvumo rodiklis viršys 1
0,5	0	0	0
0,6	$8,8 \cdot 10^{-8}$	0	0
0,7	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-9}$	0
0,8	0,017	$2,8 \cdot 10^{-4}$	0
0,9	0,17	0,062	$1,4 \cdot 10^{-8}$
0,95	0,33	0,23	$4,2 \cdot 10^{-3}$

Išvada apie statybinių medžiagų tinkamumą radiacinės saugos požiūriu ir būtinybę įvertinti galimas apšvitos nuo tiriamojoje medžiagoje esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozes daroma apie visą statybinių medžiagų partiją ir remiantis vieno bandinio vieno tyrimo rezultatais. Todėl dažniausiai turėtų būti naudojamosi aukščiau pateiktos lentelės antrajame stulpelyje pateiktomis reikšmėmis. Tačiau kai kuriais atvejais, pavyzdžiui, atlikus tam tikro skaičiaus to paties bandinio mėginių tyrimus arba tam tikrą skaičių to paties mėginio tyrimų, reikėtų naudotis 3.13 lentelės, atitinkamai, trečiojo ir ketvirtojo stulpelio tikimybių reikšmėmis. Ši tikimybė priklauso nuo standartinio nuokrypio, kuris turėtų būti nustatytas kiekvienu konkrečiu atveju. Todėl 3.13 lentelėje pateikta informacija yra apytikslė. Bet šia informacija galima naudotis ir konkrečiais atvejais, kai pats aktyvumo rodiklis yra apytikslio galimo dozių įvertinimo rezultatas, turintis orientacinę reikšmę, nors ir naudojamas apšvitai nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės normuoti.

Šių tyrimų rezultatų prigimtis yra statistinė, visada yra tam tikra tikimybė, jog tiriamos statybinės medžiagos radionuklidų aktyvumo rodiklis viršys 1, nors, remiantis konkrečiais bandinio tyrimo rezultatais, gautas aktyvumo rodiklis 1 neviršija. Kada reikia atlikti detalesnius tos pačios statybinių medžiagų partijos tyrimus, turi būti nusprendžiama tyrimų metu, o nusprendžiant galima naudotis 3.13 lentelėje pateiktais tikimybių įvertinimo rezultatais.

3.3. Gamtinės kilmės radionuklidai archeologiniuose statybinių medžiagų bandiniuose

Atskira problema yra apšvitos nuo jau pastatytų pastatų statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės tyrimai. Tokiuose pastatuose galima atlikti gama spinduliuotės dozės galios arba dozės ir radono tūrinio aktyvumo patalpose matavimus, tačiau radionuklidų savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose tyrimai yra sudėtingi vien dėl to, kad sunku paimti statybinių medžiagų bandinius. Atlikti tokius tyrimus yra svarbu norint įvertinti tokiuose pastatuose esančių žmonių apšvitą nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės. Be to, trūksta duomenų apie radionuklidų savituosius aktyvumus prieš šimtmečius naudotose (archeologinėse) statybinėse medžiagose, nežinomi jų

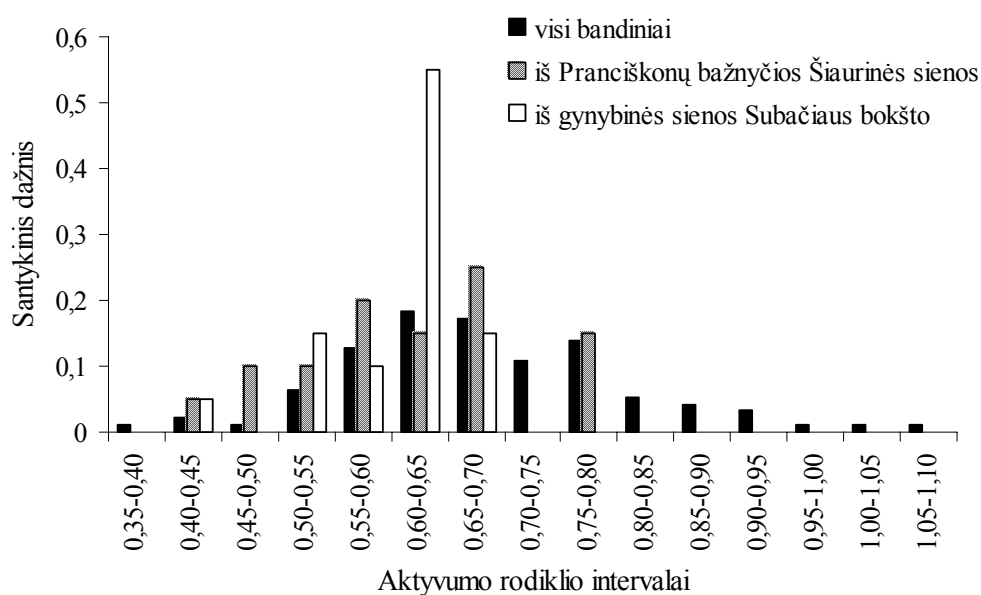
žaliavų šaltiniai ir gamybos technologijos, o tai apsunkina apšvitos dėl praeityje vykdytų žmonių veiklų pasekmių dozių tyrimą ir įvertinimą.

Todėl vienas šio darbo uždavinių buvo nustatyti gamtinės kilmės radionuklidų savituosius aktyvumus senovinėse molio plytose, kurias iš įvairių tiriamų ir restauruojamų pastatų paėmė Lietuvos istorijos instituto Miestų tyrimų skyriaus specialistai. Saulius Sarcevičius, dr. Gediminas Vaitkevičius, Fumito Tomoi bandinius surinko, datavo ir paruošė. Archeologinių statybinių medžiagų bandiniai priklauso Lietuvos instituto Miestų tyrimų skyriui. Gama spektrometru buvo ištirti 2002 – 2006 metų bandiniai.

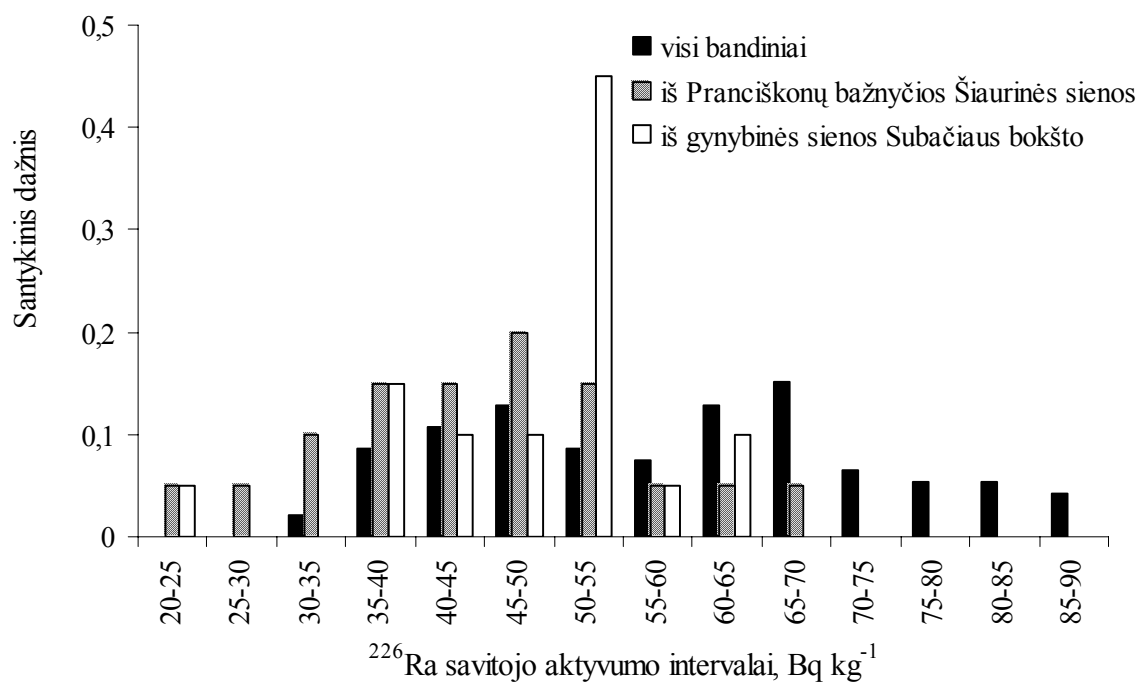
Buvo atlikti plytų bandinių (iš viso 135) iš Naugarduko, Trakų salos, Skirsnemunės ir Ragainės pilių, Vokiečių ordino pilies Veliuonoje, Vilniaus Žemutinės pilies, Vilniaus Rotušės, bastėjos ir gynybinės sienos, Archikatedros, Pranciškonų, Šv. Jonų ir Šv. Mikalojaus bažnyčių, Bernardinų ir Dominikonų vienuolynų Vilniuje, įvairių gyvenamųjų pastatų Vilniuje gama spektrometriniai tyrimai.

Visuose bandiniuose aptikti ^{226}Ra , ^{232}Th ir jų skilimo produktai bei ^{40}K . Bandiniuose iš Naugarduko pilies, Ragainės pilies ir kai kurių bandinių, paimtų iš Vilniaus pastatų iš pastato išorės, rasta ^{137}Cs , kurio ten atsirado atmosferoje bandant atomines bombas ir dėl Černobylio avarijos.

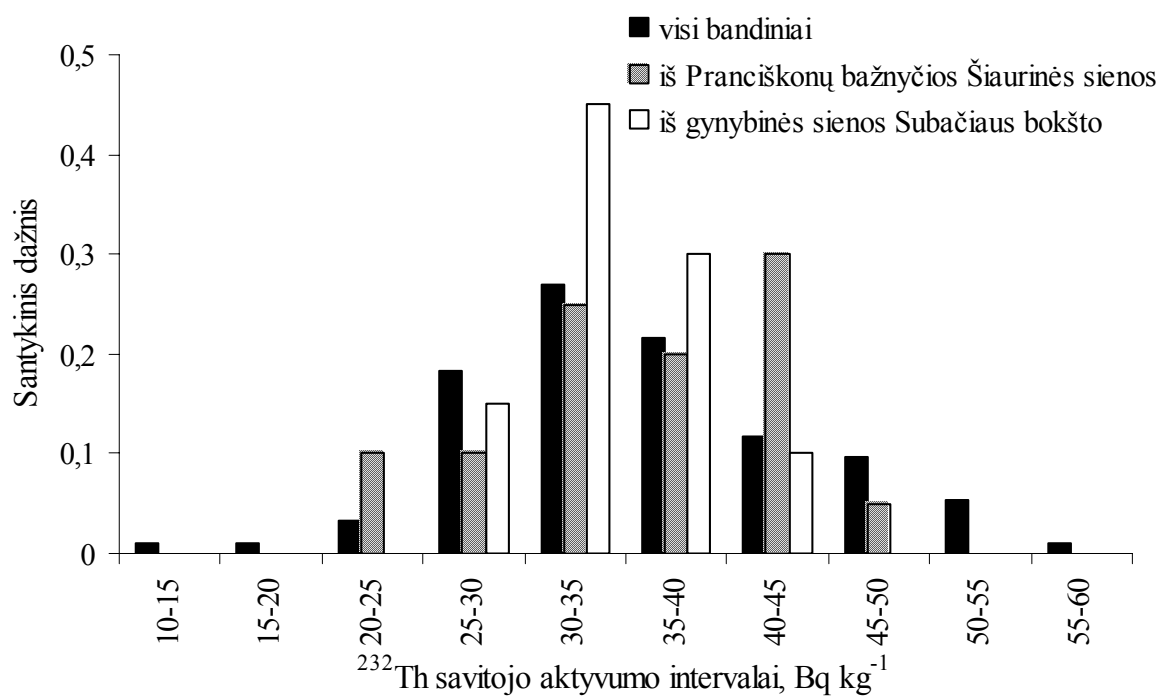
Nustatyta, kad visų trijų gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai tirtuose bandiniuose yra tipiški tokio tipo bandiniams. Nenustatyta jokių žymių anomalijų, nors aktyvumai yra plačiose ribose. 3.13 – 3.16 paveiksluose pateikti visų tirtų bandinių bei dviejų minėtų bandinių grupių radionuklidų aktyvumo rodiklio ir gamtinės kilmės radionuklidų savitųjų aktyvumų pasiskirstymai.



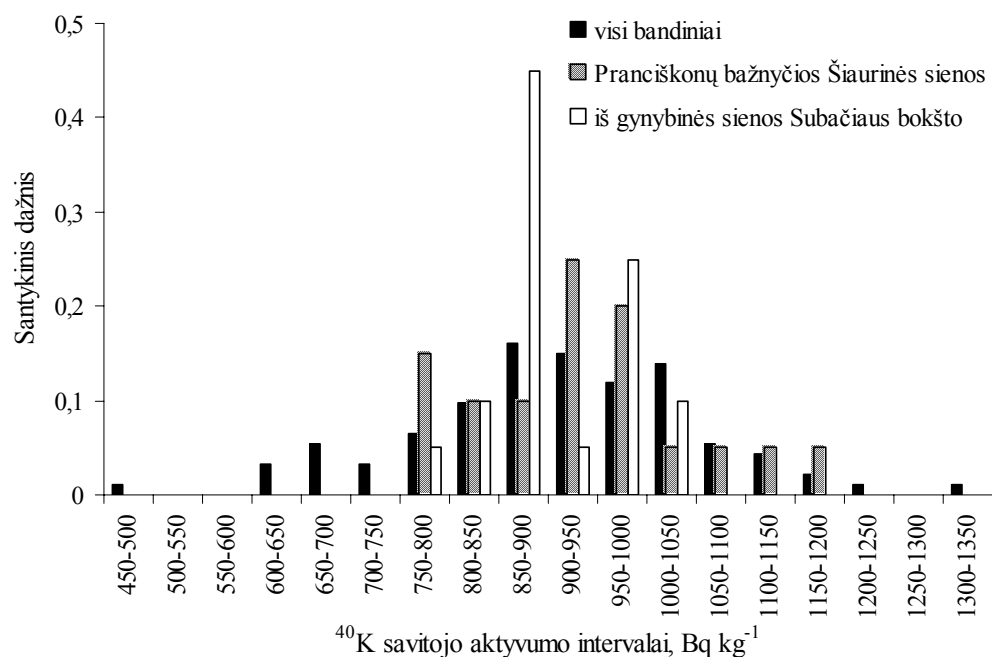
3.13 pav. Aktyvumo rodiklio pasiskirstymai tirtuose molio plytų bandiniuose



3.14 pav. ²²⁶Ra savitojo aktyvumo pasiskirstymai tirtuose molio plytų bandiniuose



3.15 pav. ²³²Th savitojo aktyvumo pasiskirstymai tirtuose molio plytų bandiniuose



3.16 pav. ^{40}K savitojo aktyvumo pasiskirstymai tirtuose molio plytų bandiniuose

Iš pateiktų pasiskirstymų matyti, kad molio plytų 20 bandinių, paimtų iš gynybinės sienos Subačiaus bokšto, ir ypač bandinių iš Pranciškaus bažnyčios šiaurinės sienos pasiskirstymai pagal radionuklidų savituosius aktyvumus yra siauresni negu visų tirtų molio plytų bandinių iš įvairių istorinių pastatų. ^{226}Ra savitųjų aktyvumų visuose tirtuose bandiniuose pasiskirstyme matyti aiškiai išreikštas antrasis maksimumas. Šis maksimumas turėtų būti susijęs su tuo, kad daliai plytų gaminti buvo naudojama žaliava, kurioje yra palyginti daug ^{226}Ra .

Palyginimui gama spektrometriškai buvo ištirta gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai 20 molio plytų bandinių, pagamintų 1999 metais „Tauragės keramikos“ gamykloje. Naudoti rezultatai, gauti tiriant gynybinės sienos bokšto ir Pranciškonų bažnyčios šiaurinės sienos plytų bandinius, nes šios dvi bandinių grupės buvo gausiausios. Rezultatų palyginimas pateiktas 3.14 lentelėje.

3.14 lentelė. Gamtinės kilmės radionuklidų savitųjų aktyvumų vidurkiai ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) su 95 % pasikliautinaisiais intervalais trijose grupėse molio plytų (po 20 bandinių)

Molio plytos	Savitasis aktyvumas, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Gynybinės sienos bokšto	53 ± 5	35 ± 2	909 ± 32
Pranciškonų bažnyčios šiaurinės sienos	51 ± 7	36 ± 3	939 ± 51
Šiuolaikinės molio plytos	74 ± 5	47 ± 4	1116 ± 21

Panaudojus t-testą, nustatyta, kad statistškai patikimo skirtumo tarp gamtinės kilmės radionuklidų savitųjų aktyvumų trijų grupių bandiniuose, paimtuose iš Pranciškonų bažnyčios šiaurinės sienos, gynybinės sienos Subačiaus bokšto ir įvairių kitų Vilniaus miesto istorinių pastatų, nėra. T-testu patikrinta, ar yra statistškai patikimas skirtumas tarp Tauragėje gamintų

molio plytų, iš kurių dabar yra atstatoma Žemutinė pilis, ir visų trijų istorinių molio plytų grupių. Nustatyta, kad šis skirtumas yra ($p < 0,01$).

Šis skirtumas nulemtas radionuklidų savitųjų aktyvumų skirtumų žaliavose. Tam tikrą įtaką galėjo turėti ir gamybos technologijos.

Gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai molio plytose gali būti indikatorius, iš kokių žaliavų ir kaip jos pagamintos. Pavyzdžiui, apdirbant molį, kuriame dėl sorbcijos ant molio dalelių paviršių yra daug urano, radionuklidai gali koncentruotis tik tam tikruose produktuose arba jų gamybos atliekose. Radionuklidai gali koncentruotis tam tikrose vietose ir tokių technologinių procesų kaip dalelių rūšiavimas pagal dydį ar flotaciją metu. Degant statybos produkciją, iš jos gali išgaruoti, pavyzdžiui, ^{226}Ra skilimo produktas ^{210}Po . Daromos ir prielaidos, kad ^{40}K savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose gali atspindėti žmogaus veiklos intensyvumą tose vietose.

Visa tai rodo, kad gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai archeologinėse molio plytose gali suteikti informacijos apie jų žaliavų šaltinius ir gamybos būdus. Problema yra tai, kad tiesiogiai susieti aktyvumus ir žaliavas bei gamybos būdus apibūdinančius parametrus yra sudėtinga. Tam būtina atlikti didelės apimties tyrimus, tarp jų ir siekiant nustatyti statistinį duomenų, gautų tiriant iš vienos vietos paimtus tokių pat molio plytų bandinius, sklaidą.

3.4. Ore sugertosios dozės galios ir radionuklidų savitojo aktyvumo statybinėse medžiagose ryšys

Ore sugertosios dozės galią (toliau – sugertosios dozės galią) patalpose lemia daug veiksnių, kadangi į patalpas patenka jonizuojančioji spinduliuotė iš kosmoso, iš grunto ir šalia tiriamojo pastato esančių objektų (pavyzdžiui, kitų pastatų), iš statybinių medžiagų, iš kurių pastatas pastatytas, radionuklidų (^{12}A). Dar vienas išorinės apšvitos šaltinis patalpose yra skvarbiają spinduliuotę spinduliuojantys patalpų ore esančio radono skilimo produktai.

Norint nustatyti, kokią įtaką sugertosios dozės galiai turi statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė, matuojant dozės galią gyvenamosiose patalpose, buvo registruojamos statybinės medžiagos, iš kurių pastatai pastatyti. Buvo registruojamos pagrindinės statybinės medžiagos, t. y., medžiagos, iš kurių pastatyta didžioji sienų dalis. Į apdailos medžiagas atsižvelgiama nebuvo.

Siekiant padidinti rezultatų patikimumą, analizuojant panaudoti ir tie rezultatai (795 patalpų), kurie gauti 1995 – 1998 metais atliekant radono tūrinių aktyvumų patalpose matavimus (Morkūnas, 2000). Išanalizuoti rezultatai, gauti 2000 – 2005 metais ištyrus iš viso 4719 patalpų. Kadangi didelė dalis gyvenamųjų patalpų (36 %) (Gyvenamieji namai ir būstai, 2003) yra daugiabučiuose namuose, dar buvo ištirti ir 609 kambariai 304 butuose tokiuose namuose.

3.15 lentelėje pateikiama informacija apie tai, kokią dalį iš visų ištirtų patalpų sudarė patalpos pastatuose, pastatytuose iš vienokių ar kitokių statybinių medžiagų. Žodžiais „apmūrytas medis“ pažymėtos patalpos, esančios mediniuose silikatinėmis plytomis apmūrytuose pastatuose. „Kitos“ statybinės medžiagos yra molis, šlakas ir pan. Matavimų rezultatai, gauti tokiuose iš „kitų“ statybinių medžiagų pastatytuose namuose, nebuvo analizuojami todėl, kad tokiuose namuose buvo atlikta nedaug matavimų (4 namuose iš molio ir 8 namuose iš šlako 1995 – 1998 metais (Morkūnas, 2000) ir 8 namuose iš molio bei 15 namų iš šlako 2000 – 2005 metais). Tokių namų mūsų šalyje yra nedaug – iš įvairių medžiagų pastatytų namų yra 9,7 %, iš kitų medžiagų – 3,7 % (Gyvenamieji namai ir būstai, 2003)). Tirtų patalpų pasiskirstymas pagal jų statybinės medžiagas pateiktas 3.16 lentelėje.

3.15 lentelė. Tirtų patalpų pasiskirstymas pagal pastatų statybinės medžiagas

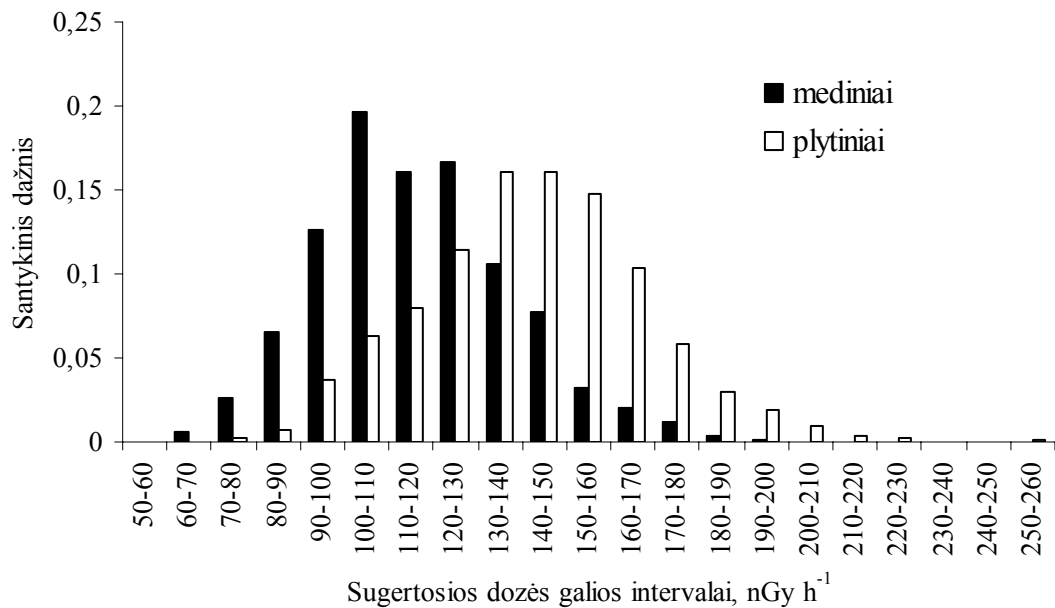
Pagrindinė statybinė medžiaga	Tirtų patalpų dalis, procentais
Plytos	49,7
Medis	32,5
Betonas	8,6
Apmūrytas medis	7,0
Kitos	2,2

Apibendrinti sugertosios dozės galios matavimų tirtose patalpose rezultatai pateikti 3.16 lentelėje.

3.16 lentelė. Dozės galios ($\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$) matavimų patalpose iš įvairių statybinių medžiagų pastatytuose pastatuose rezultatai

Parametras	Statybinė medžiaga			
	Plytos	Medis	Betonas	Apmūrytas medis
Vidurkis	132,9	107,3	117,8	109,7
Standartinis nuokrypis	25,1	21,7	22,4	21,6
Mažiausia reikšmė	58	53	53	63
Didžiausia reikšmė	250	189	184	179
Mediana	132	106	120	108

Sugertosios dozės galios pasiskirstymai iš įvairių statybinių medžiagų pastatytuose namuose esančiose patalpose yra normalieji. Šie pasiskirstymai mediniuose ir plytiniuose namuose pateikti ir palyginti 3.17 paveiksle.



3.17 pav. Sugertosios dozės galios pasiskirstymai mediniuose ir plytiniuose namuose esančiose patalpose

Visais atvejais sugertosios dozės galios vidutinės reikšmės yra artimos medianoms. Tai reiškia, kad vidutinėms reikšmėms neturi didelės įtakos nei labai didelės, nei labai mažos atskiros dozės galios reikšmės.

Iš 3.17 paveikslė pateiktų pasiskirstymų matyti, kad vidutinės sugertosios dozės galios reikšmės patalpose mediniuose ir plytiniuose namuose skiriasi. Statistiškai patikimus skirtumus rodo t-testų rezultatai. Tokie rezultatai ($p < 0,01$) gauti analizuojant vidutines sugertosios dozės reikšmes iš visų nurodytų statybinių medžiagų pastatytuose namuose.

Statistiškai patikimo skirtumo nėra tik tarp vidutinių sugertosios dozės galios reikšmių mediniuose ir apmūrytuose namuose. Tai galima paaiškinti atsižvelgiant į abiejų tipų namų ypatybes – abiem atvejais pagrindinė statybinė medžiaga yra medis, o apmūrytuose namuose išorinėje sienų pusėje yra palyginti nedidelis sluoksnis (12 cm) iš silikatinų plytų, kuriose, kaip rodo statybinių medžiagų gama spektrometriniai tyrimai, radionuklidų savitieji aktyvumai yra nedideli. Dar mažesni šių radionuklidų savitieji aktyvumai yra medienoje.

Dozės galia patalpose priklauso ne tik nuo radionuklidų savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose. Didelę reikšmę turi ir spinduliuotės šaltinio geometrija, t. y., statybinių medžiagų kiekis pastate ir tiriamųjų patalpų matmenys. Tačiau registruoti šiuos parametrus matavimų metu sudėtinga. Didelė matavimų dalis buvo atlikta namuose, pastatytuose ne pagal tipinius projektus. Susiejant sugertosios dozės galią patalpose su radionuklidų savitaisiais aktyvumais pagrindinėse pastatų statybinėse medžiagose (su šiomis statybinėmis medžiagomis), būtų sudėtinga panaudoti visas patalpų ir pastatų matmenų ypatybes. Todėl analizuojant šį ryšį buvo ieškoma parametrų, kurie yra svarbiausi sugertosios dozės galios patalpose reikšmėms. Tokie parametrai ir yra statybinės medžiagos, t. y., radionuklidų savitieji aktyvumai jose.

Panaudojant tokios analizės rezultatus svarbu, kad tai būtų galima padaryti kuo paprasčiau. Pavyzdžiui, sprendžiant tokią problemą, kaip tipinės dozės, dėl foninės spinduliuotės individualiųjų dozimetų užregistruojamos įvairiose patalpose, kurioje atliekama individualiųjų dozių stebėseną (ten, kur dirbama su jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniais ir kontroliuojamos su jais dirbančių darbuotojų apšvitos dozės), būtina žinoti, kokios tos dozės yra iš vienokių ar kitokių statybinių medžiagų pastatytuose pastatuose. Tokiais atvejais radionuklidų savitieji aktyvumai šiose statybinėse medžiagose nėra labai svarbūs, kadangi nustatant, kokią užregistruotos dozės dalį sudaro apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozė, būtina remtis informacija apie atitinkamų pastatų statybines medžiagas, o ne apie radionuklidų savituosius aktyvumus jose.

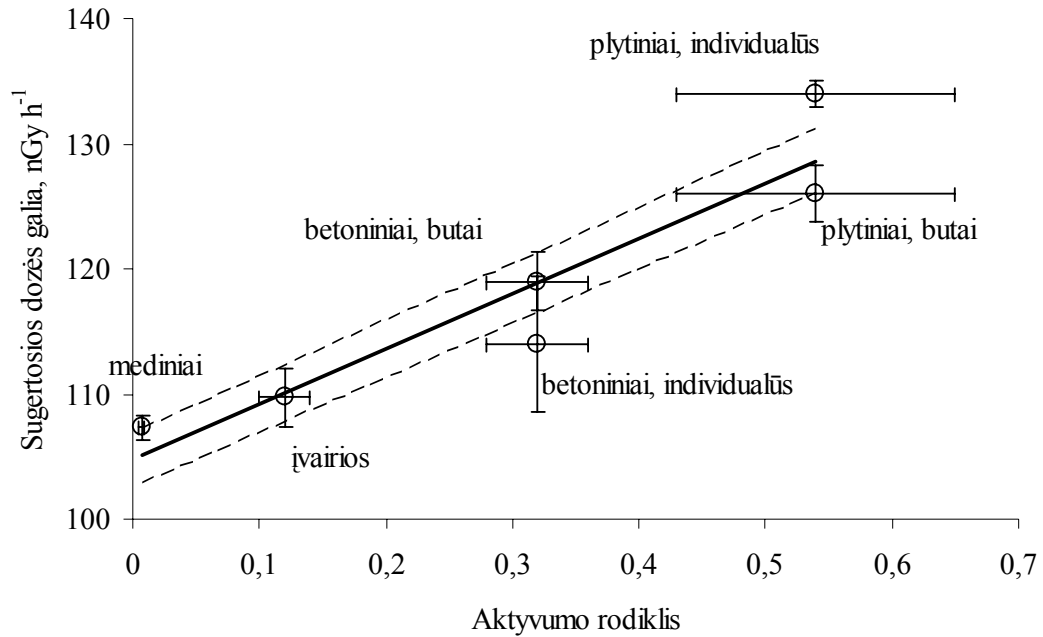
Būtina paminėti vieną svarbią sugertosios dozės galiai patalpose aplinkybę – skirtumus tarp individualiųjų ir daugiabučių namų. Daugiabučių namų patalpų įvairovė yra mažesnė negu patalpų individualiuosiuose namuose. Rezultatai, gauti abiejų tipų namų patalpose, yra palyginti 3.17 lentelėje.

3.17 lentelė. Ore sugertosios dozės galios individualiųjų ir daugiabučių namų patalpose matavimų rezultatai, $\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$

Parametras	Statybinės medžiagos ir namų tipai			
	Plytos, individualieji	Plytos, daugiabučiai	Betonas, individualieji	Betonas, daugiabučiai
Vidurkis	134	126	114	119
Standartinis nuokrypis	26	20	28	20
Mažiausia reikšmė	58	83	53	69
Didžiausia reikšmė	250	213	184	170
Mediana	133	128	112	120

t-Testas rodo, kad sugertosios dozės galios vidurkiai plytiniuose individualiuosiuose ir daugiabučiuose namuose skiriasi statistiškai patikimai ($p < 0,01$). Tai gali būti susiję su tuo, kad šie namai pastatyti iš skirtingus savituosius radionuklidų aktyvumus turinčių plytų. Keraminės plytos, kuriose radionuklidų savitieji aktyvumai didesni negu silikatinės, dažniau naudojamos individualiųjų namų statybai, o silikatinės plytos – daugiabučių namų statybai.

Statistiškai patikimo skirtumo tarp sugertosios dozės galios patalpose daugiabučiuose ir individualiuosiuose namuose iš betono nenustatyta. Dėl to, kad egzistuoja statistiškai patikimas skirtumas tarp sugertosios dozės galios vidurkių daugiabučiuose ir individualiuosiuose plytiniuose namuose, nustatant ryšį tarp šių vidurkių ir atitinkamų statybinių medžiagų radionuklidų tipinių aktyvumo rodiklių, daugiabučiai ir individualieji namai buvo išskirti. Siekiant didesnio tikslumo, atskirai buvo naudojami ir duomenys, gauti betoniniuose namuose. Šio ryšio grafikas pateiktas 3.18 paveiksle.



3.18 pav. Sugertosios dozės galios įvairių pastatų patalpose priklausomybė nuo statybinių medžiagų, naudotų šių pastatų statybai, tipinių aktyvumo rodiklių. Ištinė linija parodyta aproksimacijos tiesė, punktyrinėmis – 95% pasikliautinis intervalas

Nors individualiuosius ir daugiabučius namus aukščiau pateiktame grafike atitinka skirtingi taškai, aktyvumo rodikliai pateikiami tie patys, kadangi atliekant statybinių medžiagų radionuklidų aktyvumo rodiklių gama spektrometrinius tyrimus, atskirti, kurios statybinės medžiagos bus naudojamos vienokių ar kitokių pastatų statybai, neįmanoma – individualių ir daugiabučių namų statybai naudojamos tos pačios statybinės medžiagos (plytos, betonas).

Duomenys apie apmūrytus medinius namus irgi pateikti 3.18 paveiksle. Nustatant tipinių tokių namų statybinių medžiagų (medžio ir plytų) aktyvumo rodiklį buvo remtasi tuo, kad vidutinis medžio aktyvumo rodiklis neviršija 0,01, o apmūryti tokiems namams dažniausiai naudojamų silikatinių plytų – $(0,24 \pm 0,02)$. Todėl buvo laikoma, jog tokių namų statybinių medžiagų aktyvumo rodiklis yra $(0,12 \pm 0,01)$.

3.18 paveiksle pateiktą sugertosios dozės galios D priklausomybės nuo aktyvumo rodiklio I aproksimacijos tiesę aprašo lygtis:

$$D = 44 \cdot I + 105 . \quad (3.1)$$

Atliekant panašios priklausomybės, gautos individualių ir daugiabučių pastatų iš tų pačių statybinių medžiagų duomenų neatskiriant tarpusavyje, aproksimaciją, gaunama tiesė, kurią aprašo lygtis:

$$D = 48 \cdot I + 105 . \quad (3.2)$$

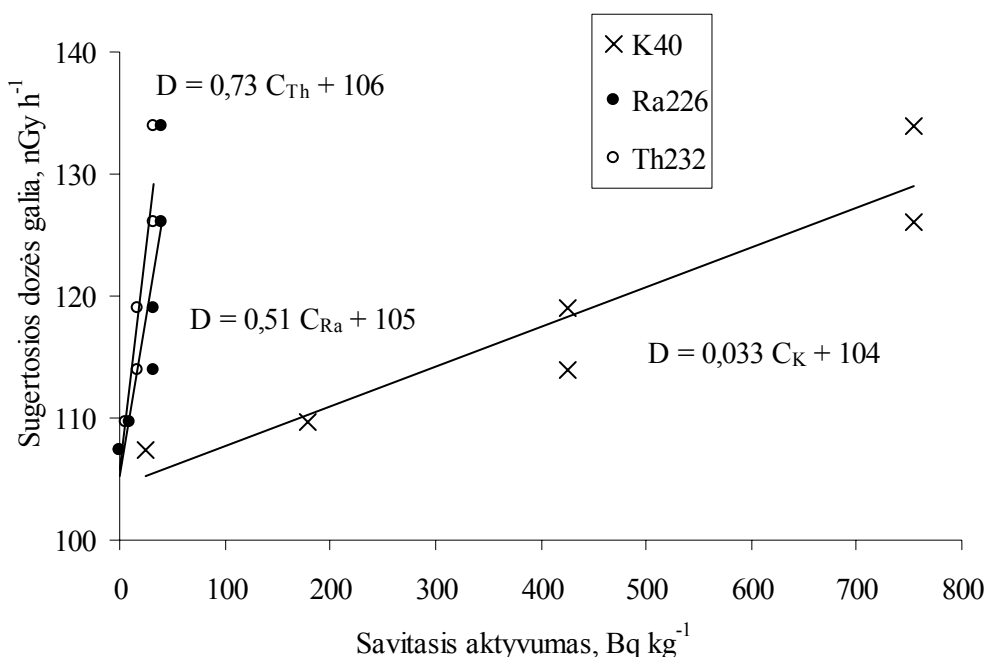
(3.1) lygtis yra tikslesnė, tačiau galima naudotis ir (3.2) lygtimi, kadangi nebuvo atsižvelgiama į patalpų daugiabučiuose ir individualiuosiuose pastatuose geometrinius skirtumus. Abi aproksimacijos lygtys duoda labai panašius rezultatus. Pavyzdžiui, jeigu aktyvumo rodiklis bus 0,5, skirtumas tarp sugertosios dozės galios reikšmių, gautų skaičiuojant abiem lygtimis, bus 1,5 % sugertosios dozės galios reikšmės ir 2,6 % šios reikšmės, kai aktyvumo rodiklis lygus 1.

Statybinių medžiagų aktyvumo rodiklis atspindi galimą visų trijų gamtinės kilmės radionuklidų ir jų skilimo produktų įtaką apšvitai. Tačiau sugertosios dozės galios patalpose priklausomybės ir nuo vidutinių atskirų radionuklidų savitųjų aktyvumų atitinkamose statybinėse medžiagose yra panašios į priklausomybę, pateiktą 3.18 paveiksle. Skiriasi tik aproksimacijos tiesių parametrai. Aproksimacijos tiesių lygtys yra:

$$\begin{aligned} D &= 0,51 \cdot c_{Ra} + 105, \\ D &= 0,73 \cdot c_{Th} + 106, \\ D &= 0,033 \cdot c_K + 104, \end{aligned} \quad (3.3)$$

čia c_{Ra} , c_{Th} , c_K – atitinkamai, ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose.

Grafiškai šios priklausomybės parodytos 3.19 paveiksle.



3.19 pav. Sugertosios dozės galios priklausomybės nuo atskirų gamtinės kilmės radionuklidų savitojo aktyvumo statybinėse medžiagose

Pastaruoju atveju duomenys, gauti iš tų pačių statybinių medžiagų pastatytuose individualiuosiuose ir daugiabučiuose namuose, taip pat buvo naudoti atskirai, t. y., išskiriant individualiuosius ir daugiabučius namus.

(3.3) lygtys pateiktos norint parodyti, kaip sugertosios dozės galia patalpose priklauso nuo tipinių radionuklidų savitųjų aktyvumų tų patalpų statybinėse medžiagose. Koreliacijos tarp sugertosios dozės galios ir radionuklidų savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose apskaičiuoti nėra įmanoma, nes dozės galios matavimai buvo atliekami patalpose, o radionuklidų savitųjų aktyvumų – statybinėse medžiagose, tačiau ne tose, iš kurių pastatyti tirti pastatai. Paimti reprezentatyvius statybinių medžiagų bandinius iš pastatų, kuriuose atliekami sugertosios dozės galios matavimai, techniškai labai sudėtinga. Tačiau to daryti ir nebūtina, kadangi pakankamas tyrimų rezultatų skaičius ryšį tarp sugertosios dozės galios ir statybinių medžiagų radionuklidų aktyvumo rodiklio leidžia nustatyti naudojantis sugertosios dozės galios matavimų patalpose ir radionuklidų savitųjų aktyvumų matavimų statybinėse medžiagose rezultatais ir statistiniais metodais.

Gautų aproksimacijos tiesių polinkiai susiję su atitinkamų radionuklidų dozės koeficientais. Tačiau dėl to, kad statybinėse medžiagose yra ir kitų radionuklidų ir dėl to, kad radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose yra tarpusavyje susiję, matyti, jog aproksimacijos tiesių polinkiams įtakos turi ne tik tas radionuklidas, nuo kurio savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose sugertosios dozės galios priklausomybė aproksimuojama, bet ir kiti du radionuklidai.

Tai, kad radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose yra susiję, rodo tai, kad koreliacijos koeficientai, nustatyti tarp atskirų radionuklidų savitųjų aktyvumų porų (panaudoti duomenys iš 1385 bandinių matavimų) yra šie: tarp ^{226}Ra ir ^{232}Th – 0,66, ^{226}Ra ir ^{40}K – 0,40, tarp ^{232}Th ir ^{40}K – 0,66. Tokį ryšį galima paaiškinti tuo, kad tiriant nebuvo aptikta tokių medžiagų, kurios pasižymėtų labai dideliais kurio nors vieno radionuklido savitaisiais aktyvumais, kai kitų dviejų radionuklidų aktyvumai yra maži.

Aproksimacijos tiesių reikšmės, kai aktyvumo rodiklis arba radionuklidų savitieji aktyvumai lygūs 0, yra panašios ir atspindi kitų apšvitos šaltinių – kosminės spinduliuotės, pastatų išorėje esančių objektų (pirmiausia grunto), radono skilimo produktų patalpose – poveikį sugertosios dozės galiai patalpose.

Į kosminės spinduliuotės įtaką sugertosios dozės galiai neatsižvelgta. To ir nereikia daryti, kai nustatoma, kokios yra apšvitos nuo foninės spinduliuotės dozės (jas irgi registruoja individualieji dozimetrai) patalpose iš vienokių ar kitokių statybinių medžiagų. Atimant apšvitos nuo foninės spinduliuotės dozę iš bendrosios individualiųjų dozimetų užregistruotos dozės, reikia atimti visų foninės spinduliuotės šaltinių, tarp jų ir į kosminės spinduliuotės, apšvitos dozę.

Tačiau norint nustatyti, kokią įtaką sugertosios dozės galiai turi statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė, į kosminę spinduliuotę atsižvelgti reikia. Tiksliau, reikia atsižvelgti į tai, kaip ši spinduliuotė sugerama statybinių konstrukcijų, t. y., kaip

ji ekranuojama. Vidutinė apšvitos nuo kosminės spinduliuotės sugertosios dozės galia priklauso nuo geografinės platumos ir aukščio virš jūros lygio. Lietuvoje ji yra $33 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$ (4A).

Šią reikšmę galima naudoti įvertinant kosminės spinduliuotės indėlį į sugertosios dozės galią patalpose, tačiau būtina žinoti, kokią įtaką turi kosminės spinduliuotės ekranavimas.

Atėmus apšvitos nuo kosminės spinduliuotės sugertosios dozės galią iš bendrosios dozės galios patalpose, gaunama panaši sugertosios dozės galios priklausomybė nuo aktyvumo rodiklio, kaip ir priklausomybė, pateikta 3.18 paveiksle, tačiau aproksimacijos kreivę aprašoma lygtimi:

$$D = 68 \cdot I + 78. \quad (3.4)$$

Naudojantis šia lygtimi, galima įvertinti, kokia bus metinė efektinė apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozė tuo atveju, kai statybinių medžiagų radionuklidų aktyvumo rodiklis bus lygus 1. Ji bus lygi $0,33 \text{ mSv}$, o tai skiriasi nuo $0,6 \text{ mSv}$ – lygio, kuriuo remiantis buvo nustatytas toks aktyvumo rodiklis (Radiation Protection 112, 1999). Tai galima paaiškinti tuo, kad šiame Europos Komisijos leidinyje daroma prielaida, kad iš atitinkamos statybinės medžiagos sumontuoti visi pagrindiniai patalpos konstrukciniai elementai – grindys, sienos ir lubos. Tuo tarpu didelėje dalyje pastatų mūsų šalyje yra kitaip, nes nemaža patalpos konstrukcinių elementų dalis yra, pavyzdžiui, iš medžio. Be to, Lietuvos patalpų geometriniai parametrai (dydis ir forma) skiriasi nuo geometrinių parametru, naudotų (Radiation Protection 112, 1999).

Tai rodo, kokią didelę reikšmę turi pastatų projektavimo ir statybų ypatumai įvairiose šalyse ar regionuose. Kartu tai leidžia padaryti išvadą apie tai, kad įvertinant statybinių medžiagų tinkamumą radiacinės saugos požiūriu, svarbu naudotis ne tik informacija apie statybinių medžiagų radionuklidų aktyvumo rodiklius, bet ir atlikti iš tokių statybinių medžiagų pastatytose patalpose būsiančių žmonių apšvitos dozių skaičiavimus.

Statybinių medžiagų radionuklidų aktyvumo rodiklio skaičiavimo metodika pagal galimą efektinę dozę yra konservatyvi, t. y., esant aktyvumo rodikliui, lygiam 1, metinė efektinė apšvitos dozė bus mažesnė už 1 mSv . Konservatyvumas yra vienas iš pagrindinių galimos apšvitos įvertinimo principų.

(3.4) pateikta priklausomybė gali būti naudojama nustatant, kokia individualių dozimetru užregistruotos dozės dalis yra nuo foninės spinduliuotės, ir ją atimti iš individualiosios dozimetrijos rezultatų. Todėl šios analizės rezultatai gali būti panaudojami užtikrinant individualiosios dozimetrijos matavimų kokybę ir padidinant jų rezultatų patikimumą.

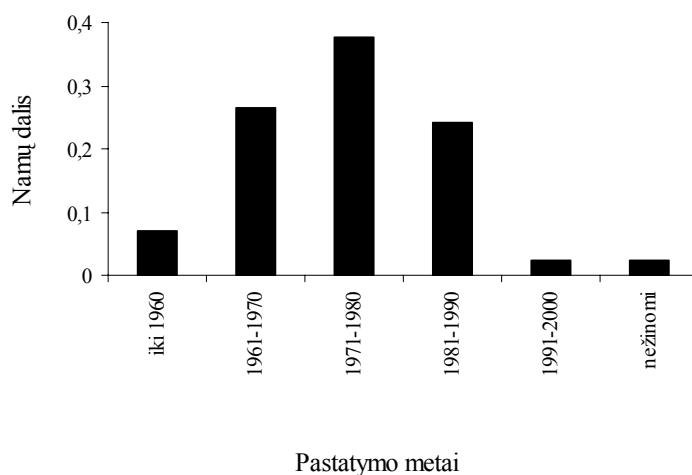
3.5. Ore sugertosios dozės galia ir radono tūrinis aktyvumas patalpose

Tam tikrą įtaką sugertosios dozės galiai patalpose turi ir radono skilimo produktai, spinduliuojantys gama spinduliuotę (daugiausia radionuklidai ^{214}Pb ir ^{214}Bi), atsirandantys tose patalpose. Vienas būdų apšvitos nuo šių skilimo produktų jonizuojančiosios spinduliuotės dozei įvertinti yra atlikti dozės arba dozės galios skaičiavimus, remiantis duomenimis apie skilimo produktų tūrinius aktyvumus patalpų ore. Tam šiuos tūrinius aktyvumus reikia dauginti iš dozės koeficientų – dydžių, rodančių, kokia bus išorinės apšvitos nuo vienetinio radono arba jo skilimo produktų aktyvumo patalpos ore dozė.

Tokių skaičiavimų metu laikoma, kad radono skilimo produktai yra tolygiai pasiskirstę patalpų ore, o patalpų tūris yra begalinis, t. y., patalpų matmenys yra daug didesni už radono skilimo produktų gama spinduliuotės kvantų siekį ore. Ši sąlyga galioja ne visada. Papildomas netikslumas taip skaičiuojant atsiranda ir dėl to, kad tam tikra radono skilimo produktų dalis būna nusėdusi ant patalpos viduje esančių paviršių. Įvertinti tokios sudėtingos geometrinės konfigūracijos šaltinio įtaką sugertosios dozės galiai neįmanoma, ypač dėl to, kad ant paviršių nusėdusių radono skilimo produktų kiekis priklauso nuo tų paviršių savybių, aerozolių kiekio patalpos ore, oro srautų patalpoje ir kitų sunkiai įvertinamų parametrų, kurie lakui bėgant gali kisti. Tai įvertinti galima kitu būdu – atliekant radono tūrinių aktyvumų ir sugertosios dozės galios matavimus toje pačioje patalpoje ir statistiškai apdorojant gautus rezultatus. Tam tose pačiose patalpose buvo atliekami radono tūrinių aktyvumų ir sugertosios dozės galios matavimai. Siekiant eliminuoti kuo daugiau parametrų, nuo kurių priklauso radono tūrinis aktyvumas ir sugertosios dozės galia, dalis radono tūrinių aktyvumų ir sugertosios dozės galios matavimų buvo atliekama vienu metu, fiksuojant šių abiejų parametrų kitimus laike. Kadangi tokiais matavimais galima ištirti palyginti nedaug patalpų (matavimo vienoje patalpoje trukmė yra apie vieną – du mėnesius), buvo atliekami ir integruojantys radono tūrinių aktyvumų matavimai, sugertosios dozės galią nustatant radono tūrinio aktyvumo matavimo pabaigoje ir pradžioje. Matavimai atlikti daugiabučiuose namuose dėl to, kad tiriamos patalpos yra aukštai ir grunto, kaip radono patalpose šaltinio įtaka yra mažesnė negu individualiuosiuose namuose (14A), todėl patalpose didesnė radono dalis yra iš statybinių medžiagų (17A).

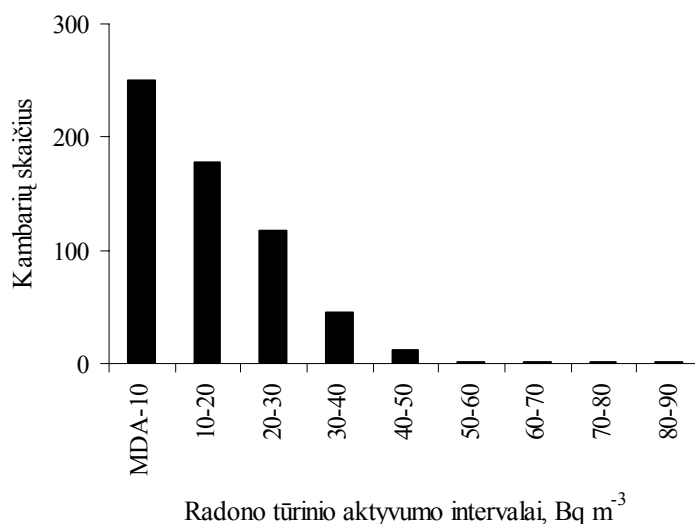
Integruojantys radono tūrinių aktyvumų tyrimai atlikti namuose nuo trijų iki dvylikos aukštų 2001 – 2004 metais. Daugiausia ištirta butų penkiaaukščiuose namuose (65 %). Visuose daugiaaukščiuose namuose buvo rūšiai, tačiau matavimų juose rezultatai analizei nebuvo naudojami, nes šios patalpos negyvenamos, išskyrus vieną butą Vilniuje, kuris įrengtas penkiaaukščio namo rūsyje. Šio buto radono tūrinių aktyvumų vidurkis buvo $167 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, sugertosios dozės galios vidurkis – $175 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$. Šis rezultatas analizuojant irgi nenaudotas.

Matavimai buvo atliekami ne visuose to paties namo aukštuose, kadangi atlikti matavimus visuose aukštuose yra sudėtinga. Tačiau dalis matavimų buvo atlikta ir kiekviename to paties namo aukšte (tos pačios laiptinės kiekvieno aukšto viename bute). Tuo buvo siekiama sumažinti parametų, turinčių įtakos radono tūrinių aktyvumų kitimams, skaičių (pavyzdžiui, skirtingą grunto įtaką skirtingose vietose) (10A). Taip ištirti 45 namai. Tyrimai atlikti daugiaaukščiuose namuose, kurie gyventojų teigimu pastatyti nuo 1959 iki 2001 metų, vidutiniškai – 1975 metais. Dalies namų pastatymo metų gyventojai nežinojo. Daugiaaukščių namų pasiskirstymas pagal pastatymo metus yra 3.20 paveiksle.



3.20 pav. Daugiaaukščių namų pasiskirstymas pagal pastatymo metus

Radono tūrinių aktyvumų pasiskirstymas tirtose patalpose pateiktas 3.21 paveiksle.



3.21 pav. Radono tūrinio aktyvumo atskiruose kambariuose paskirstymas daugiaaukščiuose namuose. MDA – minimalus matuojamas aktyvumas

3.21 paveiksle pasiskirstymas yra logaritminis normalusis. Vidutinis radono tūrinis aktyvumas daugiabučiuose namuose yra $13 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, o tai yra mažiau už vidutinį radono tūrinį

aktyvumą individualiuosiuose namuose ($55 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$). Šis skirtumas statistiškai yra patikimas ($p < 0,01$) (6A), (13A).

Nustatyti, kiek radono į patalpas patenka iš statybinių medžiagų, galima analizuojant, kaip radono tūriniai aktyvumai priklauso nuo daugiaaukščio namo aukšto. Duomenys apie vidutinius radono tūrinius aktyvumus įvairiuose aukštuose pateikiami 3.18 lentelėje.

3.18 lentelė. Vidutinis radono tūrinis aktyvumas įvairiuose daugiaaukščių namų aukštuose

Aukštas	Matavimų skaičius	Radono tūrinių aktyvumų vidurkis*, $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
1	111	$19,4 \pm 2,7$
2	103	$12,5 \pm 2,5$
3	111	$14,2 \pm 2,3$
4	99	$13,3 \pm 2,3$
5	115	$16,8 \pm 2,0$
6	14	17 ± 7
7	18	$14,4 \pm 4,2$
8	12	16 ± 9
9	16	$8,8 \pm 3,6$
10	4	$6,7 \pm 3,2$
11	2	14 ± 10
12	4	17 ± 11

* – vidurkis su 95 % pasikliautinoju intervalu

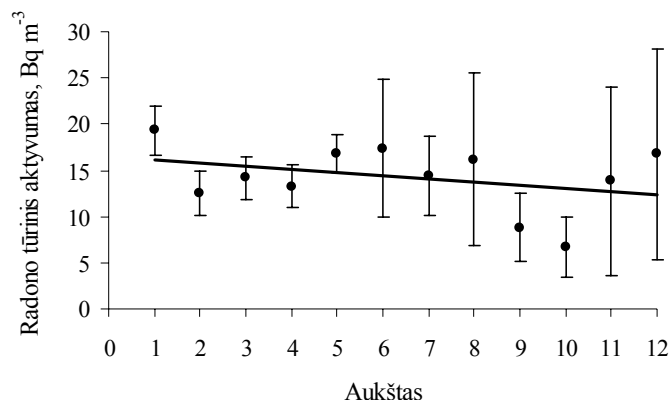
Daugiausia matavimų (89 %) atlikta pirmajame – penktajame aukštuose. Kadangi tiriamieji namai buvo parenkami atsitiktinai, šis faktas atspindi butų pasiskirstymą pagal aukštą.

3.22 paveiksle pateikta grafinė radono tūrinių aktyvumų priklausomybė nuo namo aukšto ir šios priklausomybės aproksimacijos kreivė – tiesė, kurią aprašo lygtis:

$$A = 17,4 \cdot n - 0,15, \quad (3.5)$$

čia A – radono tūrinis aktyvumas, n – aukšto numeris.

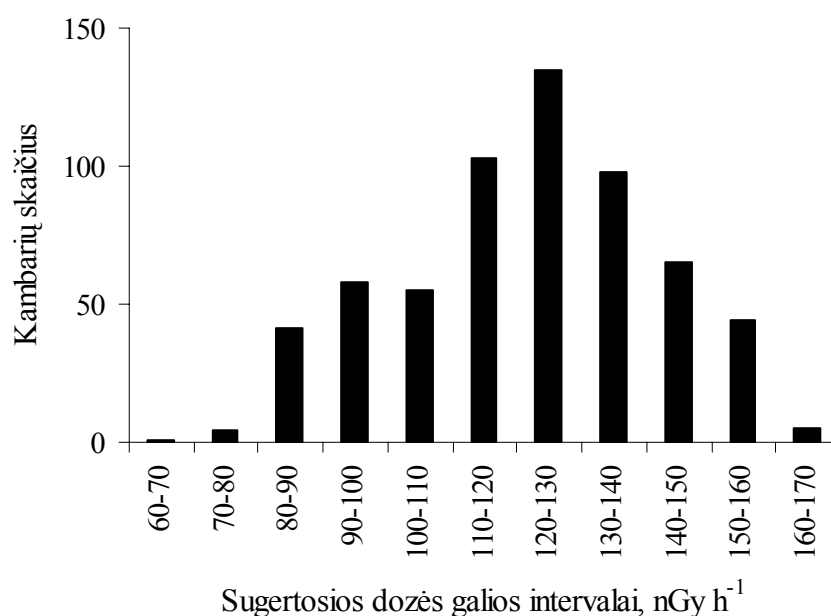
Grafike panaudoti ir šeštojo – dvyliktojo aukštų vidurkiai, nors šiuose aukštuose atlikta palyginti nedaug matavimų.



3.22 pav. Vidutinio radono tūrinio aktyvumo (su 95 % pasikliautinoju intervalu) priklausomybė nuo namo aukšto. Pateikta tiesinė aproksimacija

Radono tūrinis aktyvumas kylant į viršų mažėja. Iš šios priklausomybės matyti, kad radono, atsiradusio iš kitų šaltinių negu gruntas, tūrinis aktyvumas yra $(10 - 15) \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Pagrindinis radono šaltinis yra statybinės medžiagos. Nors šis dydis nustatytas apytiksliai, pirmuosiuose daugiaaukščių namų aukštuose iš statybinių medžiagų atsiradusio radono vidutiniškai yra apie 50 %, o individualiuosiuose namuose, kur vidutinis radono tūrinis aktyvumas yra $55 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (4A), (13A), iš statybinių medžiagų atsiradusio radono vidutiniškai turėtų būti apie (20 – 25) %.

3.23 paveiksle pateiktas sugertosios dozės galios pasiskirstymas atskiruose kambariuose daugiaaukščiuose namuose, kuriuose buvo atliekami integruojantys radono tūrinių aktyvumų matavimai. Kaip minėta, sugertosios dozės matavimai buvo atliekami kiekvieno radono tūrinio aktyvumo matavimo, kuris trukdavo apie 3 – 5 savaites, pabaigoje ir pradžioje.



3.23 pav. Sugertosios dozės galios atskiruose kambariuose pasiskirstymas daugiaaukščiuose namuose

Sugertosios dozės galios reikšmės pasiskirsto pagal logaritminį–normalųjį dėsnį. Iš sugertosios dozės galios ir radono tūrinių aktyvumų pasiskirstymų matyti, kad sugertosios dozės galia skirtinguose patalpose gali skirtis beveik tris kartus, radono tūriniai aktyvumai – kelias dešimtis kartų.

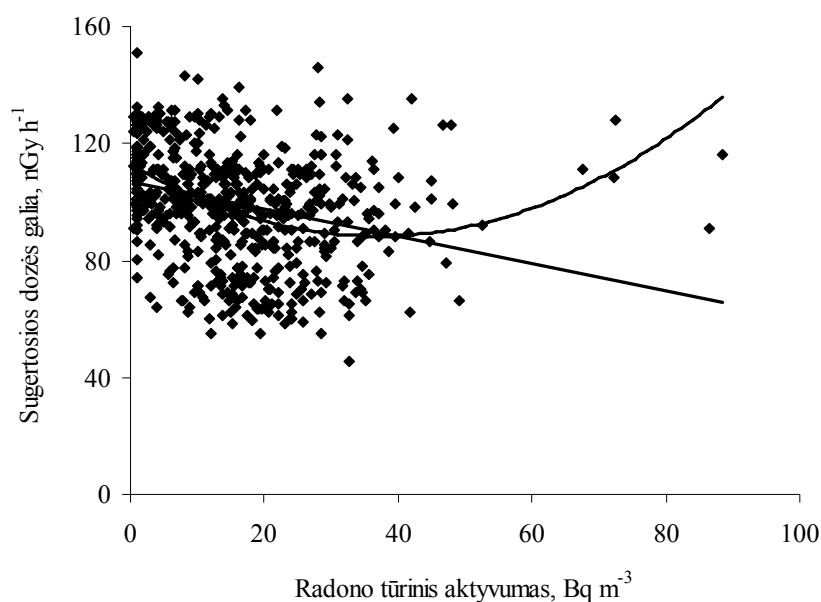
Išanalizavus matavimų, atliktų visuose tos pačios laiptinės aukštuose, rezultatus, ir naudojant t-testą, nustatyta, kad statistškai patikimo skirtumo tarp sugertųjų dozių atskiruose aukštuose nėra. Vidutinis radono tūrinis aktyvumas pirmajame aukšte statistškai patikimai skiriasi ($p < 0,05$) nuo tūrinio aktyvumo vidurkio antrajame aukšte.

Siekiant nustatyti, kokią įtaką sugertosios dozės galiai turi radono skilimo produktų gama spinduliuotė, buvo išanalizuota, kaip sugertosios dozės galia priklauso nuo radono tūrinių

aktyvumą. Buvo laikoma, kad radono skilimo produktų aktyvumas patalpoje proporcingas radono aktyvumui toje pačioje patalpoje.

3.24 paveiksle pateiktas atitinkamas grafikas gautas iš visų tyrimų rezultatų. Grafike panaudotos dviejų tipų aproksimacijos – tiesinė ir polinominė. Polinominė aproksimacija naudota siekiant įvertinti sugertosios dozės galios ir radono tūrinio aktyvumo ryšį skirtinguose radono tūrinių aktyvumų reikšmių intervaluose.

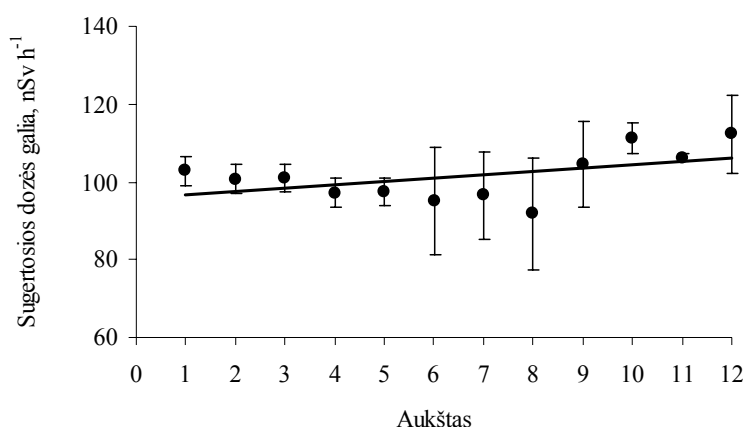
Apšvitos nuo kosminės spinduliuotės sugertosios dozės galia buvo atimta. Nustatant, kokią dydį reikia atimti, buvo naudojama informacija apie kosminės spinduliuotės ekranavimą įvairiuose namų aukštuose. (1A), (5A) nurodoma, kad šis koeficientas pirmajame – trečiajame aukštuose lygus 0,66, ketvirtajame aukšte ir aukščiau – 0,80. Kosminės spinduliuotės įtakos įvertinimui šiuo atveju naudotas šis šaltinis, kadangi jame pateikiama informacija apie kosminės spinduliuotės ekranavimo skirtumus įvairiuose namų aukštuose.



3.24 pav. Sugertosios dozės galios (atėmus apšvitos nuo kosminės spinduliuotės dozės galia) ir radono tūrinio aktyvumo visuose aukštuose visuose tirtuose daugiaaukščiuose namuose ryšys

Iš 3.24 paveikslo matyti, kad jeigu naudojama tiesinė aproksimacija, gaunama, kad radono tūriniam aktyvumui didėjant, sugertosios dozės galia mažėja. Naudojant polinominę 2-osios eilės aproksimaciją, gaunama, kad radono tūriniam aktyvumui didėjant maždaug iki $40 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, sugertosios dozės galia mažėja, o virš $40 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ima didėti. Tokią priklausomybę, kai didėjant radono tūriniam aktyvumui sugertosios dozės galia mažėja, galima paaiškinti. Tai gali būti susiję su kitų faktorių, nuo kurių priklauso sugertosios dozės galia, įtaka ir nedidele radono skilimo produktų įtaka sugertosios dozės galiai kai radono tūrinis aktyvumas patalpose yra mažas. Priklausomybės, analogiškos parodytai 3.24 paveiksle., buvo nustatytos atskiriems aukštams (pirmajam – penktajam). Rezultatai rodo, kad panašios sugertosios dozės galios ir

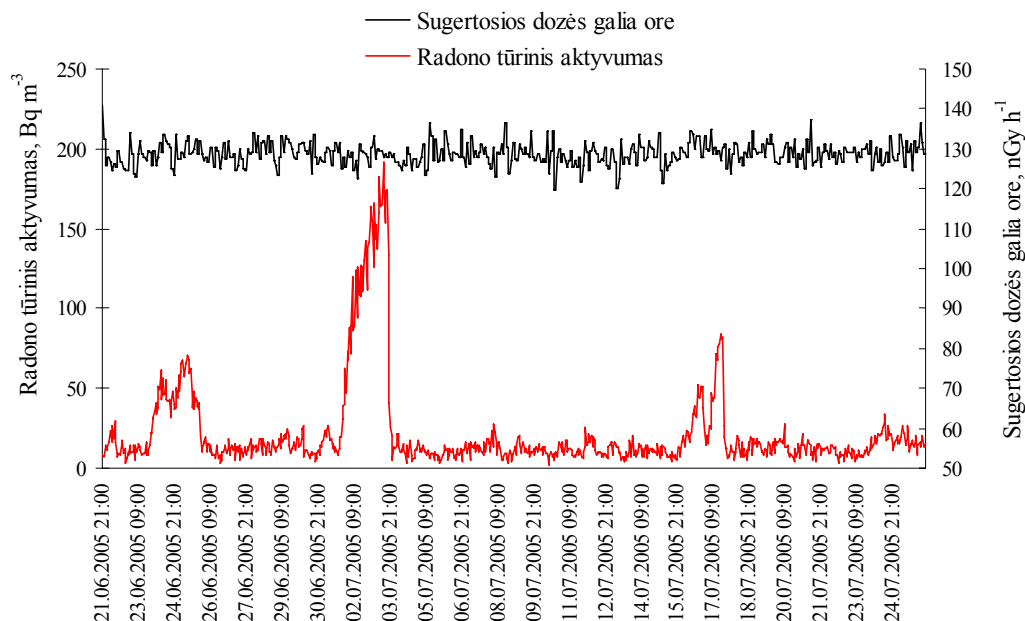
radono tūrinių aktyvumų priklausomybės gaunamos ir atskiruose aukštuose. Tai reiškia, kad tokiai priklausomybei kosminė spinduliuotė, kurios intensyvumas, kylant į viršų, dėl mažesnio jos sugėrimo didėja, įtakos neturi. Gali būti naudojamos abi sugertosios dozės galios ir radono tūrinio aktyvumo ryšio aproksimacijos kreivės, tačiau polinominė aproksimacija turėtų būti tikslesnė didesniuose radono tūrinių aktyvumų intervaluose. Analizuojant radono tūrinius aktyvumus ir sugertosios dozės galios reikšmes skirtinguose aukštuose, nustatyta, kad tiek vienas, tiek kitas parametras kylant į viršų mažėja. Vidutinio radono tūrinių aktyvumo priklausomybė nuo namo aukšto pateikta 3.22 paveiksle, o sugertosios dozės galios – 3.25 paveiksle.



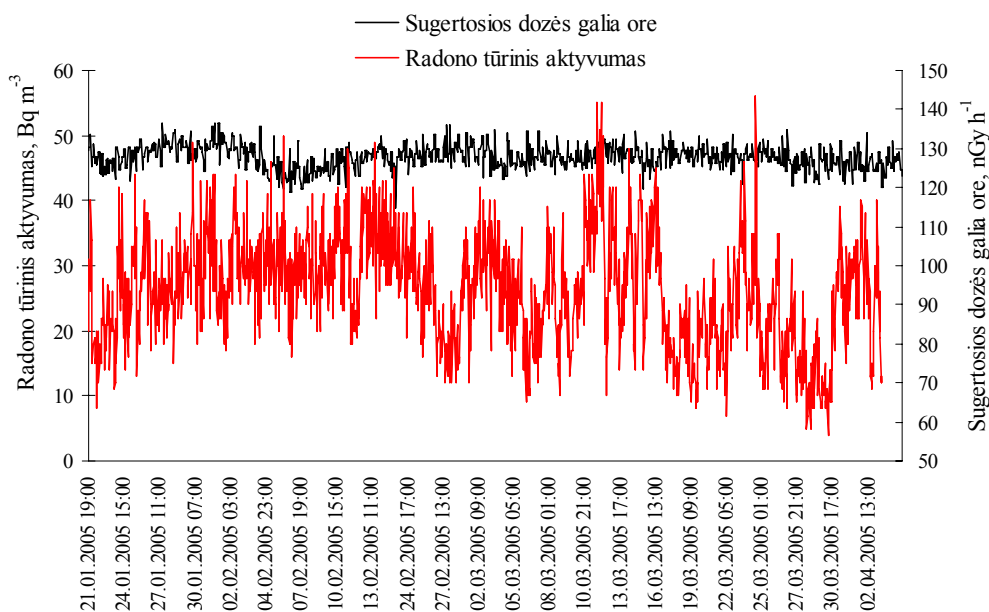
3.25 pav. Vidutinės sugertosios dozės (be kosminės spinduliuotės) galios skirtinguose aukštuose reikšmės (su 95 % pasikliautinaisiais intervalais) ir jų tiesinė aproksimacija

Matyti, kad sugertosios dozės galia, didėjant namo aukštui, didėja. Tai gali būti susiję su kosminės spinduliuotės intensyvumo kitimu kylant į viršų. Naudoti ekranavimo atskiruose aukštuose koeficientai (1A) Siekiant eliminuoti kuo daugiau parametrų, nuo kurių priklauso radono tūrinis aktyvumas ir sugertosios dozės galia, buvo atliekami ir jų matavimai vienu metu vienoje patalpoje (aukščiau minėti antrojo tipo matavimai). Du tokių matavimų rezultatų pavyzdžiai pateikti 3.26 ir 3.27 paveiksluose. Matavimai buvo atlikti skirtingų namų penktuosiuose aukštuose esančiuose butuose. Rezultatai, pateikti pavyzdžiuose, rodo, kad net panašiuose butuose radono tūrinių aktyvumų kitimai skiriasi.

Bent jau iš sugertosios dozės galios ir radono tūrinių aktyvumų kitimų, fiksuotų vienu ir tuo pačiu metu tose pačiose patalpose, aiškiai išreikšto ryšio tarp šių dviejų parametrų nematyti, nors abiejuose pavyzdžiuose radono tūrinių aktyvumų kitimai gana stipriai išreikšti. Tai rodo, kad nustatyti sugertosios dozės galios priklausomybę nuo radono tūrinių aktyvumų nėra paprasta. Tam reikia daug matavimų rezultatų.

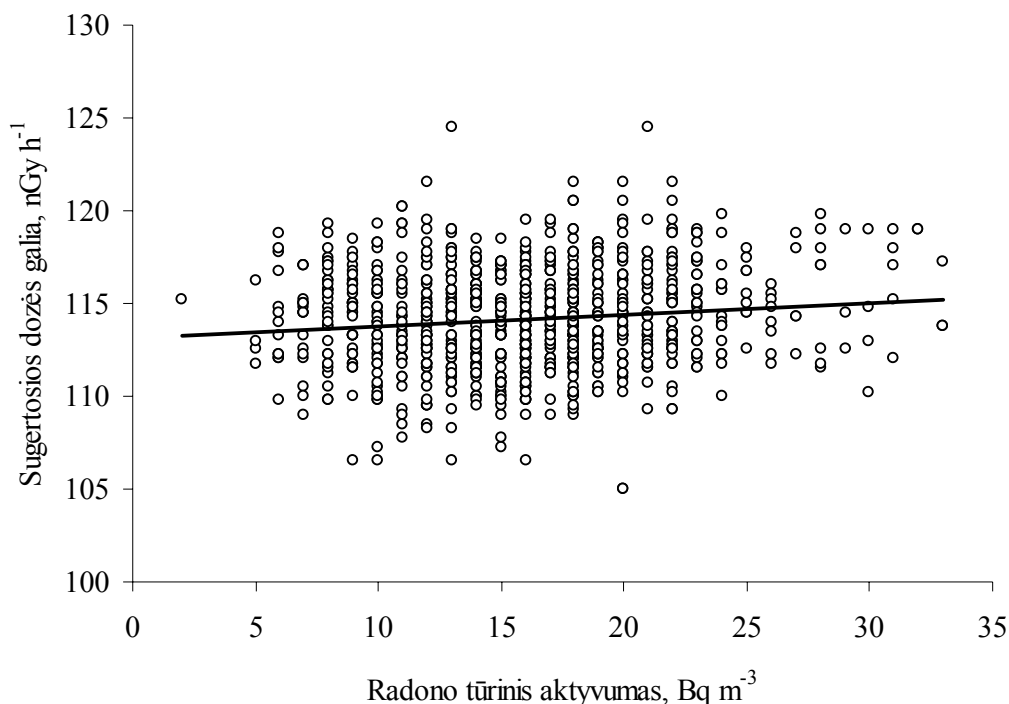


3.26 pav. Sugertosios dozės galios ir radono tūrinio aktyvumo kitimas daugiaaukščio namo bute penktajame aukšte. Atlikti 825 matavimai



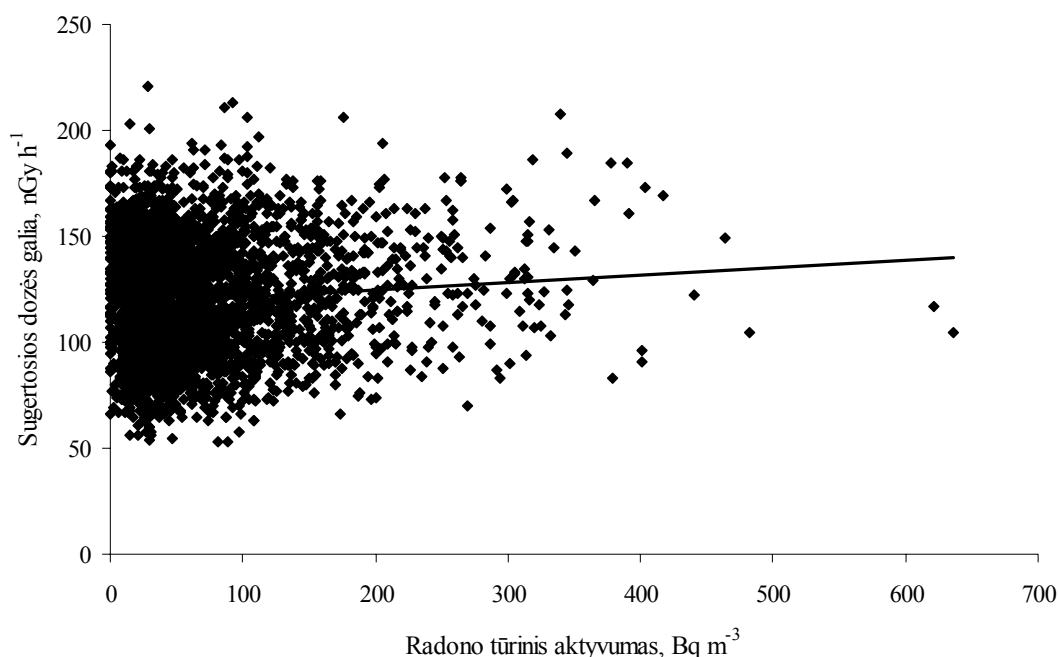
3.27 pav. Sugertosios dozės galios ir radono tūrinio aktyvumo kitimas daugiaaukščio namo bute penktajame aukšte. Atlikti 1562 matavimai

3.28 paveikslo matavimų rezultatai pateikti sistemoje, kurios koordinatės – ore sugertosios dozės galia ir radono tūrinis aktyvumas. Tai duoda galimybę sugretinti šiuos du parametrus. Apšvitos nuo kosminės spinduliuotės dozės galia analizuojant rezultatus šiuo atveju atimama nebuvo, kadangi kosminė spinduliuotė įtakos aproksimacijos tiesės polinkiui neturi.



3.28 pav. Sugertosios dozės galios ir radono tūrinių aktyvumų, matuotų vienu metu devynaukščio namo septinto aukšto bute 2003 metų sausio – vasario mėnesiais, ryšys ir tiesinė aproksimacija

Iš 3.28 paveikslo matyti, kad dozės galia didėjant radono tūriniam aktyvumui didėja. Panašios priklausomybės gautos vienu metu atliekant sugertosios dozės galios ir radono tūrinių aktyvumų matavimus kitose patalpose kituose aukštuose. Skiriasi tik aproksimacijos kreivės posvyris. Posvyrio skirtumus galima paaiškinti tuo, kad sugertosios dozės galia priklauso ne tik nuo jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinio aktyvumo, bet ir nuo jo geometrijos. Geometrija priklauso nuo tiriamos patalpos matmenų ir aerozolių koncentracijos patalpos ore. Nuo pastarojo parametro priklauso radono skilimo produktų, vos tik jiems atsiradus, elgesys. Jeigu aerozolių koncentracija nedidelė, radono skilimo produktai greičiau nusėda ant patalpos paviršių. Jeigu aerozolių patalpos ore yra daug, radono skilimo produktai nusėda ant aerozolių ir ilgiau lieka patalpų ore. Vienu ir kitu atveju susidaro skirtinga apšvitos šaltinio geometrija, o tai lemia skirtingas išorinės apšvitos sąlygas ir skirtingas sugertosios dozės galios reikšmes. Tokia priklausomybė labai svarbi mažesnio ploto ir tūrio patalpose. Palyginimui, panaši priklausomybė gauta ir individualiuosiuose namuose, kuriuose tūrinių aktyvumų matavimai atlikti 2000 – 2004 metais ir kurie yra regionuose, kur 1995 – 1998 metų matavimų metu (Morkūnas, 2000) aptikti didesni radono tūriniai aktyvumai (2A), (11A). 2000 – 2004 metais buvo ištirta 1660 individualių namų 3331 kambarys. Atitinkamas grafikas pateiktas 3.29 paveiksle.



3.29 pav. Sugertosios dozės galios ir radono tūrinių aktyvumų individualiuosiuose namuose ryšys ir jo tiesinė aproksimacija (2000 – 2004 metų matavimų regionuose, kuriuose 1995 – 1998 metų matavimų metu aptikti didesni radono tūriniai aktyvumai, duomenys)

Nors individualiuosiuose namuose radono tūriniam aktyvumams kur kas didesnę įtaką turi gruntas, o dozės galiai – statybinės medžiagos, toks sugertosios dozės galios ir radono tūrinio aktyvumo ryšys gaunamas todėl, kad radono tūrinio aktyvumo reikšmių intervalas yra daug platesnis negu šis intervalas daugiabučiuose namuose.

Dėl priežasčių, susijusių su apšvitos šaltinio geometrija (radono skilimo produktų pasiskirstymu patalpose), neįmanoma nustatyti vienodo sugertosios dozės galios padidėjimo vienetiniam radono tūrinio aktyvumo padidėjimui visoms patalpoms.

Į tai būtina atsižvelgti planuojant, kaip bus atliekami radono ar jo skilimo produktų tūrinių aktyvumų, ypač kai pagrindinis radono šaltinis patalpose yra statybinės medžiagos, matavimai. Kartais tam atliekami gama spektrometriniai matavimai patalpos viduryje esančiu spektrometru ir, atsižvelgus ir radionuklidų savituosius aktyvumus patalpos konstrukcijose, bandoma apskaičiuoti, kiek radono skilimo produktų yra patalpos ore. Dėl radono skilimo produktų pasiskirstymo patalpoje neapibrėžtumų, galimos didelės taip atliktų matavimų rezultatų neapibrėžtys (4A).

Susieti sugertosios dozės galią su radono tūriniais aktyvumais yra sudėtinga. Šis ryšys gali būti ir neigiamas, t. y., didėjant radono tūriniam aktyvumui, sugertosios dozės galia mažėja. Tokį neigiamą ryšį paaiškinti būtų galima tuo, kad sugertosios dozės galiai kur kas didesnę įtaką turi statybinėse medžiagose esančių radionuklidų skvarbioji spinduliuotė. Netgi tose patalpose, kurios yra individualiuosiuose namuose ir vidutinis radono tūrinis aktyvumas yra $55 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, apšvitos nuo radono skilimo produktų dozės galia yra nuo 0,16 iki $3,6 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$, o tai yra keli

bendros sugertosios dozės galios patalpose procentai. Dėl patalpų vėdinimo ir statybinių medžiagų dangos, trukdančios radonui iš statybinių medžiagų patekti į išorę, gali nebūti koreliacijos tarp radono tūrinių aktyvumų patalpose ir šios spinduliuotės intensyvumo. Tada radono skilimo produktų įtaką ore sugertosios dozės galiai bus didesnė negu statybinėse medžiagose esančių radionuklidų skvarbioji spinduliuotės įtaka.

Taigi, analizuojant duomenis, gautus skirtingose patalpose, gali atsirasti parametrų, kurių įtaka paslepia radono įtaką sugertosios dozės galiai. Ši problema išsprendžiama, atliekant matavimus toje pačioje patalpoje. Tokie matavimai turi būti atliekami tam tikrą laiko tarpą, kuris priklauso ir nuo vieno matavimo trukmės, tokiu būdu užtikrinant pakankamą rezultatų statistinį patikimumą. Ši trukmė turėtų būti apie vieną mėnesį.

3.6. Apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės modeliavimas

Apšvitos dozės (sugertosios arba efektinės dozės arba dozės galios) reikšmės nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės gali būti nustatomos ir jas skaičiuojant (modeliuojant). Skaičiuojant remiamasi informacija apie radionuklidų savituosius aktyvumus statybinėse medžiagose, statybinių konstrukcijų iš tų statybinių medžiagų formą ir išdėstymą, patalpų dydį ir formą. Skaičiavimais galima ne tik nustatyti, kokios bus apšvitos dozės vienų ar kitų statybinių medžiagų patalpose, bet ir gauti šių apšvitos dozių dydžių pasiskirstymą patalpose bei kitą informaciją, kuri gali būti svarbi įvertinant statybinių medžiagų tinkamumą radiacinės saugos požiūriu (3A).

Kitas tokio apšvitos dozių įvertinimo tikslas yra modeliuojant gautos apšvitos dozės palyginimas su kitokiais būdais gautomis dozėmis (pavyzdžiui, atliekant matavimus). Taip nustatomas įvairių dozės įvertinimo būdų tikslumas ir patikimumas.

Kadangi specialių programų, kuriomis būtų skaičiuojamos apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės, nėra, šiame darbe buvo panaudota programa „VISIPLAN-3D“. Šia programa galima apskaičiuoti, kokios yra apšvitos nuo įvairių šaltinių (radionuklidinės sudėties ir jų geometrinės konfigūracijos požiūriu) dozės galios reikšmės įvairiose tų šaltinių atžvilgiu esančiose vietose. Turint informaciją apie dozės galią bei šią dozės galią lemiančių šaltinių savybes, galima apskaičiuoti metines efektines dozes.

Skaičiuojant apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozes ir apibūdinant šaltinį, būtina aprašyti patalpas, kurios bus naudojamos kaip modelinės patalpos. Išanalizavus (Gyvenamieji namai ir būstai, 2003) pateiktus duomenis apie gyventojų pasiskirstymą pagal butų tipus, buvo nustatyta, kad Lietuvoje daugiausia gyventojų gyvena dviejų kambarių butuose. Tai sudaro 37 % gyventojų – didžiuosiuose miestuose

vidutiniškai 41 % (38 % – 44 %), apskrityse vidutiniškai 37 % (33 % – 39 %). Todėl buvo pasirinktas standartinis dviejų kambarių butas. Nors ir tokie butai būna dviejų pagrindinių tipų ir įvairaus planavimo, pasirenkant modelinių patalpų planavimą buvo remtasi bendrais parametrais ir principais, kuriais naudojamos planuojant gyvenamąsias patalpas. Pasirinktas standartinis patalpų aukštis, statybinių konstrukcijų storis, atsižvelgta į tai, kokie būna tokių patalpų matmenys, ir į tai, kaip jose išdėstomi langai.

Patalpa laikytas visas butas, kadangi didžiausias apšvitos dozes lemia jo grindyse, lubose ir išorinėse sienose esantys radionuklidai. Į vidines pertvaras atsižvelgta nebuvo, nes dėl nedidelio savo storio jos vaidina nedidelę įtaką tiek kaip apšvitos šaltinis, tiek kaip apsaugos nuo spinduliuotės ekranas. Tačiau, siekiant įvertinti, kokią įtaką turi tokios pertvaros, buvo išanalizuotas ir dozės galios pasiskirstymas tokiai pertvarai esant. Modelinės patalpos parametrai, naudoti skaičiuojant apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozes, pateikti 3.19 lentelėje.

3.19 lentelė. Modelinės patalpos parametrai, naudoti skaičiuojant sugertosios dozės galią

Parametras	Parametro reikšmė
Patalpos matmenys (ilgis × plotis × aukštis), m ³	9 × 6 × 2,5
Sienų storis, cm	25
Sienų statybinė medžiaga	Betono blokai
Sienų statybinės medžiagos tankis, g·cm ⁻³	2,35
Grindų ir lubų storis, cm	25
Grindų ir lubų statybinė medžiaga	Kiaurymėtos perdangos plokštės
Grindų ir lubų perdengimo plokštėse betonas sudaro	0,9 %
Langų matmenys (plotis × aukštis), m ²	1,50 × 0,90
Langų aukštis nuo grindų, m	0,70
²²⁶ Ra savitasis aktyvumas, Bq·kg ⁻¹ – grindyse, lubose	83
²¹⁴ Pb, ²¹⁴ Bi savitieji aktyvumai, Bq·kg ⁻¹ – grindyse, lubose	39
²²⁸ Ac, ²¹² Pb savitasis aktyvumas, Bq·kg ⁻¹ – grindyse, lubose	38
²⁰⁸ Tl savitasis aktyvumas, Bq·kg ⁻¹ – grindyse, lubose	13
⁴⁰ K savitasis aktyvumas, Bq·kg ⁻¹ – grindyse, lubose	1050
²²⁶ Ra savitasis aktyvumas, Bq·kg ⁻¹ – sienose	56
²¹⁴ Pb, ²¹⁴ Bi savitieji aktyvumai, Bq·kg ⁻¹ – sienose	26
²²⁸ Ac, ²¹² Pb savitasis aktyvumas, Bq·kg ⁻¹ – sienose	25
²⁰⁸ Tl savitasis aktyvumas, Bq·kg ⁻¹ – sienose	8,3
⁴⁰ K savitasis aktyvumas, Bq·kg ⁻¹ – sienose	625

Į tai, kokiame aukšte patalpos yra, atsižvelgta nebuvo. Kadangi visas daugiaaukštis namas pastatytas iš tų pačių statybinių medžiagų, aukštas apšvitos nuo radionuklidų, esančių statybinėse medžiagose, jonizuojančiosios spinduliuotės dozei įtakos neturi. Nuo aukšto priklauso apšvitos nuo kosminės spinduliuotės, grunto radionuklidų spinduliuotės ir iš grunto išsiskiriančio radono skilimo produktų spinduliuotės dozė, tačiau modeliuojant šie apšvitos šaltiniai analizuojami nebuvo.

Sugertosios dozės galios ore skaičiavimams buvo naudojami radionuklidai, kurie spinduliuoja gama spinduliuotę. Būtent ši spinduliuotė sukelia išorinę apšvitą. Tokie radionuklidai, kaip, pavyzdžiui, ^{218}Po (alfa spindulio) įtakos šiai dozei neturi. Gama spindulių ^{210}Pb , ^{212}Bi , ^{234}Th , ^{228}Th energijos ir kvantinės išeigos yra labai mažos, todėl į juos skaičiuojant dozes atsižvelgta irgi nebuvo. Radionuklidai, į kuriuos atsižvelgta, nurodyti 3.20 lentelėje. Modeliuojant naudota gama spinduliuotė, kurią spinduliuoja 3.20 lentelėje nurodyti radionuklidai.

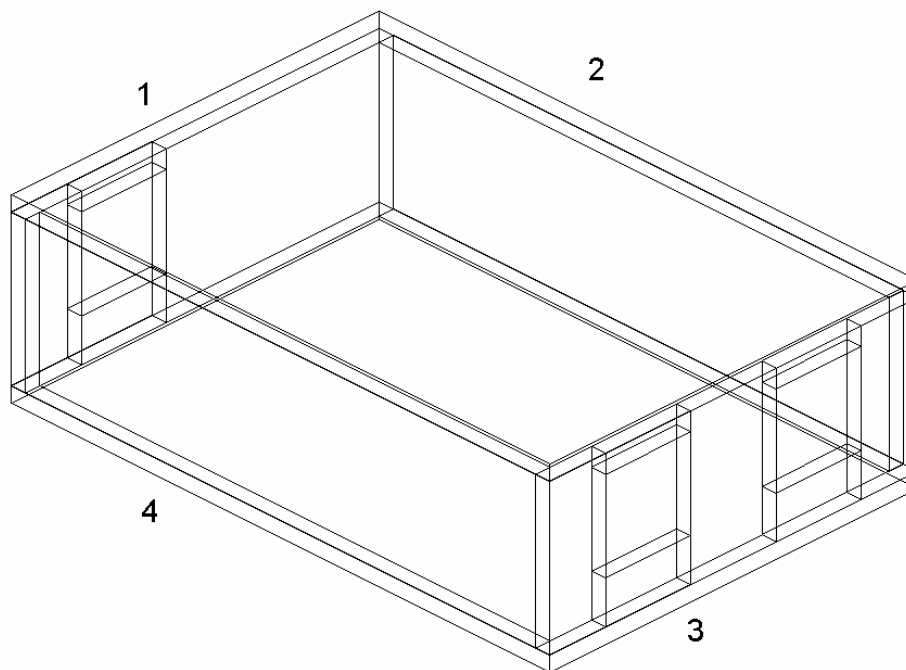
3.20 lentelė. Radionuklidai, į kuriuos atsižvelgta modeliuojant sugertosios dozės galią

Pagrindinis radionuklidas	Skilimo produktai
^{226}Ra	^{214}Pb , ^{214}Bi
^{232}Th	^{228}Ac , ^{212}Pb , ^{208}Tl
^{40}K	

Nustatant tipinius aktyvumus, remtasi statybinių medžiagų gama spektrometrinių tyrimų metu gautais rezultatais. ^{226}Ra skilimo produktų ^{214}Pb ir ^{214}Bi savitieji aktyvumai mažesni už ^{226}Ra savituosius aktyvumus, nes dalis radžiui ^{226}Ra skylant atsiradusio radono ^{222}Rn iš statybinių medžiagų patenka į išorę. Tipinės šių skilimo produktų savitųjų aktyvumų reikšmės gautos irgi iš statybinių medžiagų gama spektrometrinių tyrimų.

Nors grindims, luboms ir sienoms naudojama ta pati statybinė medžiaga – betonas, tačiau radionuklidų aktyvumai šiose statybinėse konstrukcijose yra skirtingi, skirtingi ir betono kiekiai jose. Nustatant šiuos aktyvumus, buvo naudotasi betono gama spektrometrinių tyrimų rezultatais ir atsižvelgta į šių konstrukcijų tankius (betono kiekius jose), kadangi kiaurymėtose perdangos plokštėse yra tuštumų (informacija apie betono ir tuštumų tūrių santykius gauta iš konstrukcijų gamintojų). Modelinės patalpos brėžinys parodytas 3.30 paveiksle. Skaičiais parodyti sienų numeriai.

Įvertinant modeliavimo neapibrėžtį, buvo atsižvelgta į A ir B tipo neapibrėžtis. A tipo neapibrėžtis nustatyta iš radionuklidų savitųjų aktyvumų betono bandiniuose matavimų rezultatų. Santykinė vienos sigmos dydžio neapibrėžtis buvo: Ra^{226} savitojo aktyvumo – 7 %, Th^{232} – 5 %, K^{40} – 4 %.



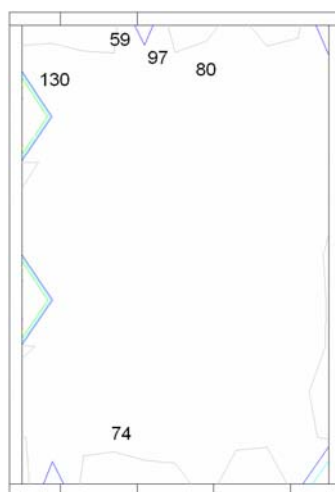
3.30 pav. Schematinis modelinės patalpos vaizdas

B tipo neapibrėžtis nustatyta modeliavimui naudota programa atliekant 100 dozės galios skaičiavimų esant tiems patiems parametrams. Ji lygi 2 %.

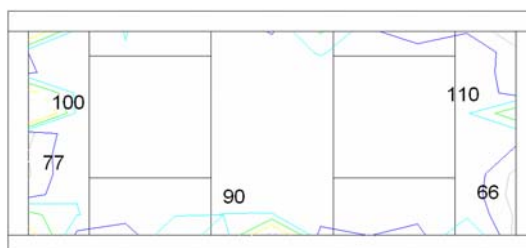
Bendra modeliavimo neapibrėžtis nustatyta iš neapibrėžčių kvadratų sumos kvadratinės šaknies.

Gauta, kad santykinė modeliavimo neapibrėžtis skaičiuojant dozės galią ir dozę, nulemtas visų trijų radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės, yra 10 %, nulemtas Ra^{226} jonizuojančiosios spinduliuotės – 7 %, Th^{232} – 5 %, K^{40} – 4 %.

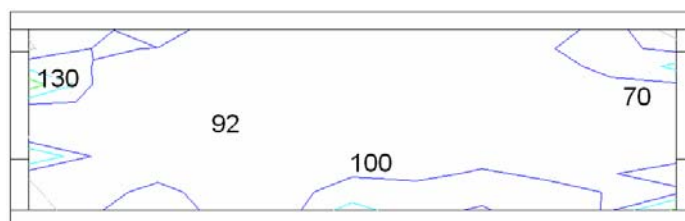
Vienas svarbiausių modeliavimui naudojamos programos „VISIPLAN-3D“ privalumų yra galimybė nustatyti modeliujamo parametro – sugertosios dozės galios patalpose – pasiskirstymą naudotojo nustatytu tikslumu ir jo pasirinktose plokštumose. Šie pasiskirstymai horizontalioje (esančioje 1,25 m aukštyje virš grindų) ir dviejose viena kitai statmenose vertikaliose plokštumose, einančiose per modelinės patalpos centrą, parodyti 3.31 – 3.33 paveiksluose. 1,25 m aukštis pasiskirstymui pasirinktas todėl, kad tokiam aukštyje dažniausiai būna patalpose esančio žmogaus organai, pasižymintys didžiausiu jautriu apšvitai, t. y., turintys didžiausius organų jautrio koeficientus. Jokių standartų ar rekomendacijų, kokiame aukštyje turi būti skaičiuojama dozės galia arba dozė, nėra. Svarbiausia šį aukštį nurodyti kartu su skaičiavimų rezultatais. Šiame darbe pateikiami dozės galios pasiskirstymai ir vertikaliose plokštumose, o tai leidžia įvertinti dozės galios priklausomybę nuo aukščio.



3.31 pav. Sugertosios dozės galios ($\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$) pasiskirstymas horizontalioje plokštumoje, esančioje 1,25 m aukštyje virš grindų

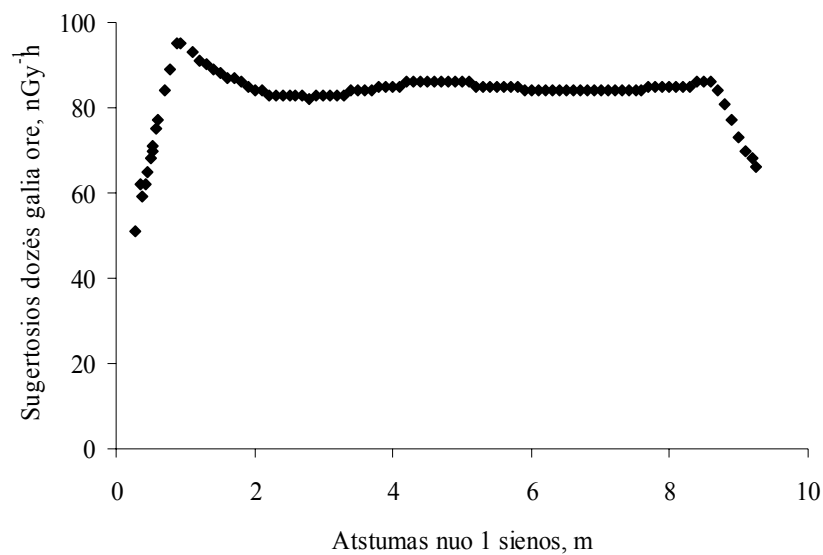


3.32 pav. Sugertosios dozės galios ($\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$) pasiskirstymas vertikalioje plokštumoje, einančioje per modelinės patalpos centrą ir jungiančioje 2 ir 4 sienas

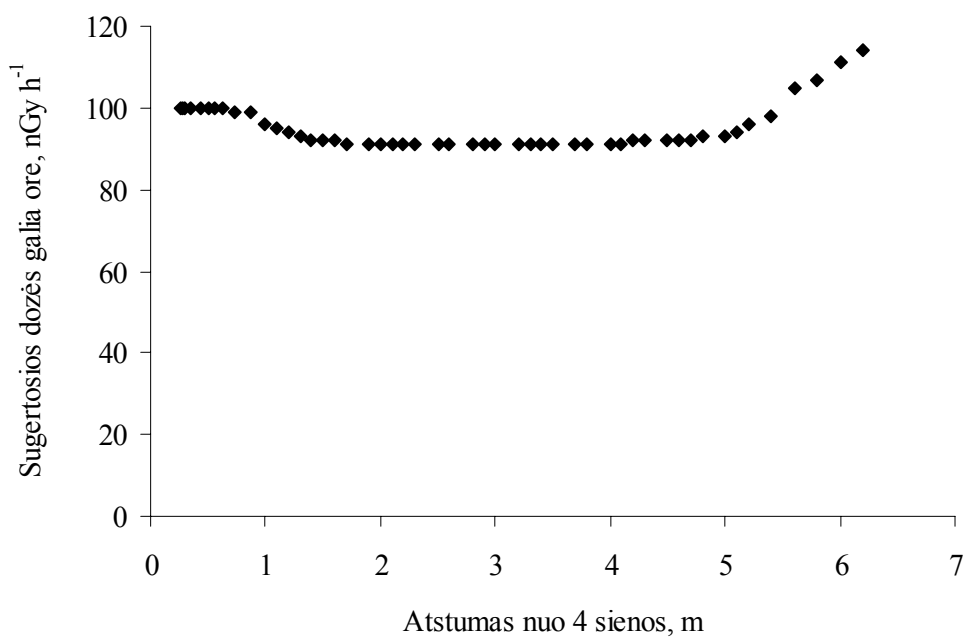


3.33 pav. Sugertosios dozės galios ($\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$) pasiskirstymas vertikalioje plokštumoje, einančioje per modelinės patalpos centrą ir jungiančioje 1 ir 3 sienas

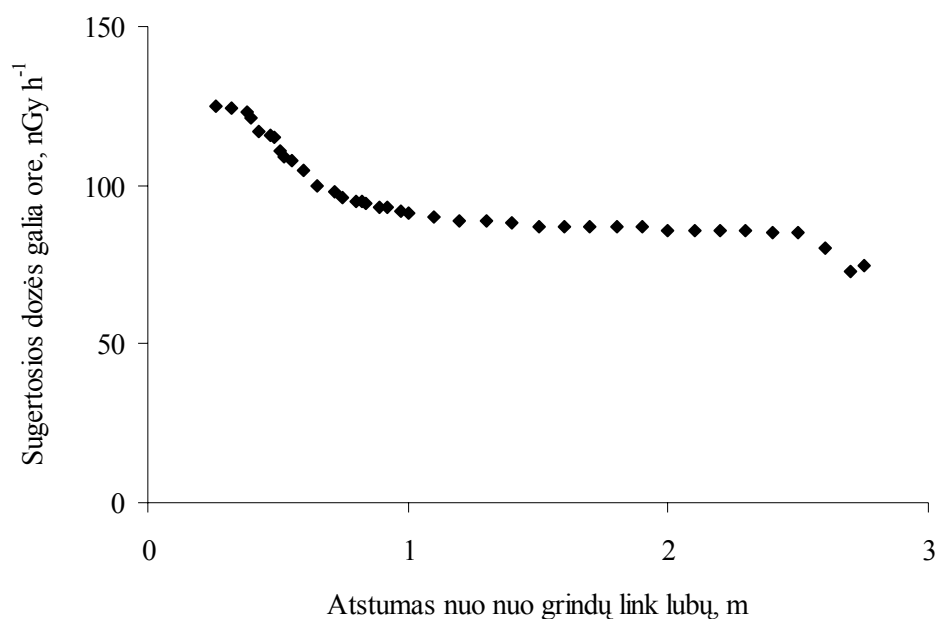
Iš 3.31 – 3.33 paveiksluose pateiktų pasiskirstymų matyti, kokią įtaką dozės galiai turi įvairios statybinės konstrukcijos. Dozės galia modelinėje patalpoje priklauso nuo vietos patalpoje – atskiruose taškuose dozės galios reikšmės tarpusavyje skiriasi iki 3 kartų. Tiksliau šių konstrukcijų įtaka įvertinta žemiau. Detalesnė informacija apie dozės galios pasiskirstymus pateikta 3.34 – 3.37 paveiksluose, kur parodyti dozės galios aukščiau pavaizduotų plokštumų simetrijos ašyse pasiskirstymas.



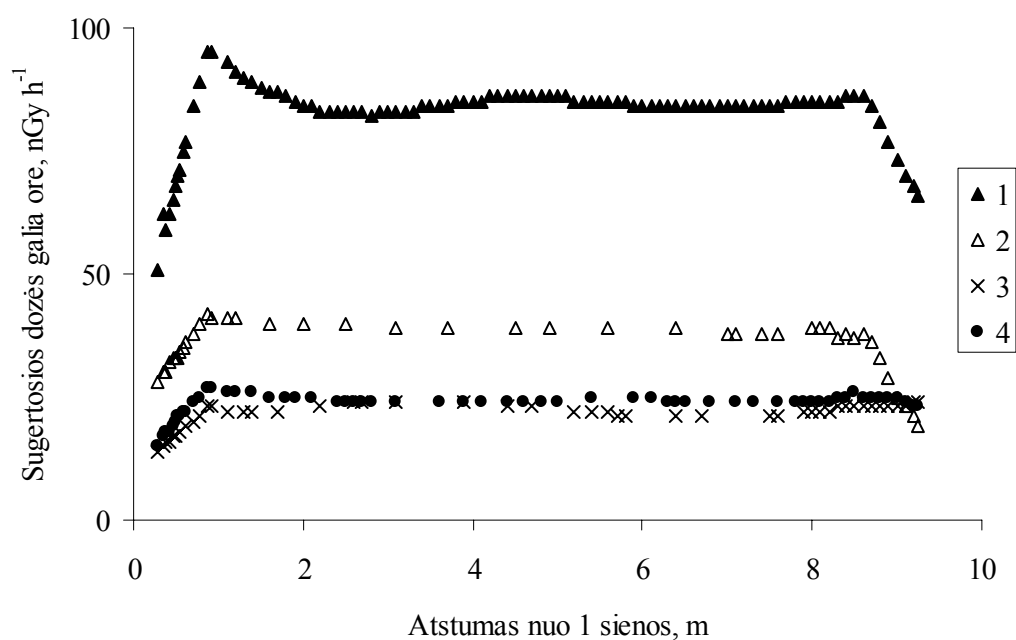
3.34 pav. Sugertosios dozės galios kitimas linijoje, jungiančioje 1 ir 3 sienas, einančioje patalpos viduriu ir esančioje horizontalioje plokštumoje 1,25 m aukštyje nuo grindų



3.35 pav. Sugertosios dozės galios kitimas linijoje, jungiančioje 2 ir 4 sienas, einančioje patalpos viduriu ir esančioje horizontalioje plokštumoje 1,25 m aukštyje nuo grindų



3.36 pav. Sugertosios dozės galios kitimas vertikalioje linijoje, jungiančioje lubas ir grindis ir einančioje per patalpos centrą



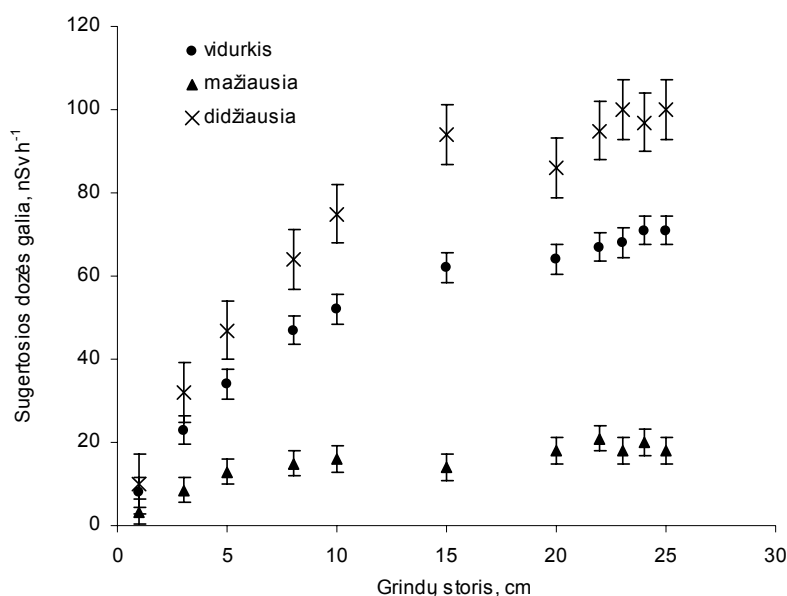
3.37 pav. Sugertosios dozės galios kitimas linijoje, jungiančioje 1 ir 3 sienas, einančioje patalpos viduriu ir esančioje horizontalioje plokštumoje 1,25 m aukštyje nuo grindų: 1 – nuo visų radionuklidų, 2 – ^{40}K , 3 – ^{226}Ra ir jo skilimo produktų (^{214}Pb , ^{214}Bi), 4 – ^{232}Th skilimo produktų (^{228}Ac , ^{212}Pb , ^{208}Tl)

Pateikti pasiskirstymai rodo, kokią svarbią reikšmę turi atstumas iki apšvitos šaltinio ir šio šaltinio matmenys ir forma, o tai rodo, kad įvertinant statybinių medžiagų tinkamumą radiacinės saugos požiūriu, būtina kuo tiksliau ir tikroviškiau aprašyti statybines konstrukcijas, kuriose esančių radionuklidų spinduliuotės sukeliamos apšvitos dozės analizuojamos. Iš kitos pusės, matyti, kad kuo analizuojamas taškas yra toliau nuo statybinės konstrukcijos, tuo dozės

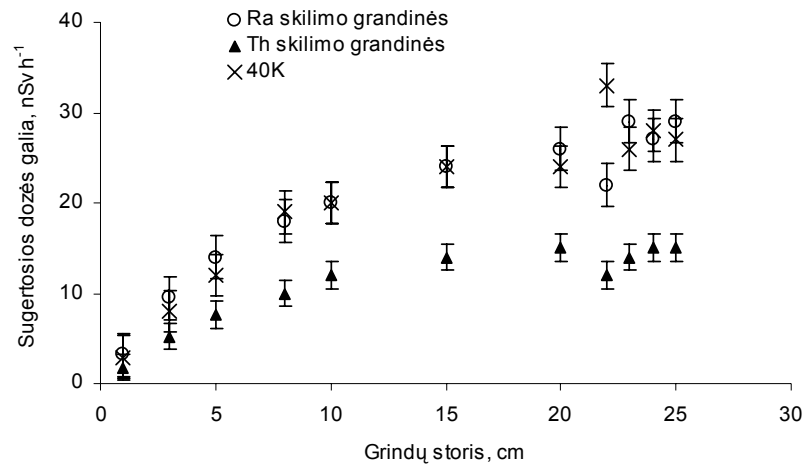
galia kintant atstumui kinta mažiau. Šiam atstumui viršijant 1 m, dozės galia erdvėje beveik nekinta. Tai reiškia, kad atliekant dozės galios matavimus patalpoje ir siekiant šių matavimų reprezentatyvumo, matuoti reikia toliau, kaip 1 m nuo patalpos sienų, grindų ir lubų. Tikslus matavimo taško, jeigu jis yra toliau kaip 1 m nuo statybinės konstrukcijos, vietos pasirinkimas didelės įtakos dozės galios arba dozės matavimo rezultatams neturi.

Remiantis 3.34 – 3.36 paveiksluose pateiktais dozės galios pasiskirstymais, nustatyta, kokias išorinės apšvitos metines efektines dozes gaus tokioje patalpoje esantys žmonės. Jos priklauso nuo vietos patalpoje. Ši dozė, praleidžiant 80 % (7000 valandų) viso laiko viduje ir būnant patalpos centre, būtų lygi 0,47 mSv per metus. Vienodai būnant visose patalpos vietose, vidutinė dozė būtų 0,60 mSv per metus. Kadangi aprašyti žmogaus buvimo vietas patalpoje sudėtinga, vertinant galimas dozes reikėtų remtis radiacinės saugos konservatyvumo principu ir įvertinimo rezultatu laikyti didžiausią galimą dozę.

Atliekant tipinių dozių skaičiavimus, nustatyti tikslias parametrų, nuo kurių priklauso skaičiavimų rezultatai, reikšmės sudėtinga. Todėl šios reikšmės turi būti kontroliuojamos – jos turi būti pateikiamos kartu su įvertinimo rezultatais. Esant būtinybei, keičiant parametrų reikšmes turi būti analizuojama šių parametrų pokyčių įtaka įvertinimo rezultatams – atliekama metodo jautrio analizė. 3.38 ir 3.39 paveiksluose pateikiamos apskaičiuotos vieno iš parametrų – grindų storio – įtakos dozės galiai priklausomybės. Keičiant grindų storį, keičiasi betono kiekis – tūris ir masė. Laikyta, kad visų storių grindyse betono tankis tas pats ir savitasis bet kurio radionuklido aktyvumas yra vienodas. Kiti buto konstrukciniai elementai yra betoniniai, bet juose nėra radionuklidų.

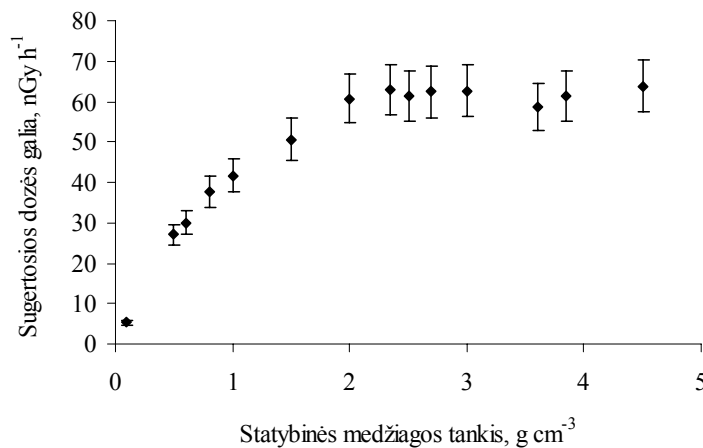


3.38 pav. Visų gama radionuklidų spinduliuotės įtaka sugertosios dozės galios vidutinei, mažiausiai ir didžiausiai reikšmėms patalpoje priklausomai nuo grindų storio. Dozės galios vidurkio standartinis nuokrypis – $3,6 \text{ nSv} \cdot \text{h}^{-1}$, apskaičiuotos mažiausios dozės galios reikšmės standartinis nuokrypis – $3,1 \text{ nSv} \cdot \text{h}^{-1}$, didžiausios standartinis nuokrypis – $7,2 \text{ nSv} \cdot \text{h}^{-1}$



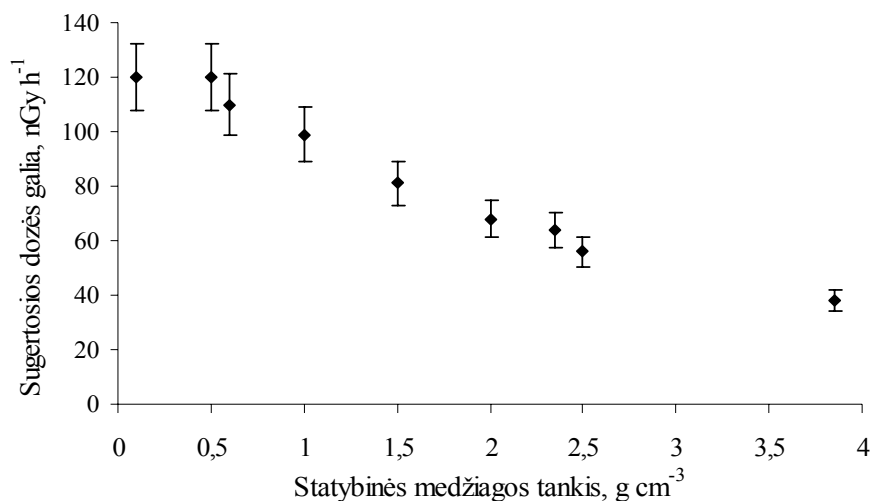
3.39 pav. ^{226}Ra , ^{232}Th šeimų gama radionuklidų ir ^{40}K spinduliuotės įtaka sugertosios dozės galios vidutinei, mažiausiai ir didžiausiai reikšmėms patalpoje priklausomai nuo grindų storio. Sugertosios dozės galios nuo ^{226}Ra skilimo grandinės lemiama dozės galios standartinis nuokrypis – $2,4 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$, ^{232}Th skilimo grandinės standartinis nuokrypis – $1,5 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$, ^{40}K standartinis nuokrypis – $2,4 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$

Iš pateiktų priklausomybių matyti, kad didėjant grindų storiui, apšvitos nuo jose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės didėja. Šių priklausomybių pobūdį lemia ne tik bendras radionuklidų aktyvumas grindyse (didėjantis didėjant grindų storiui), bet ir šių radionuklidų spinduliuotės sugėrimas pačiose grindyse (grindų storiui didėjant irgi didėjantis). Abi šios priklausomybės yra tarpusavyje konkuruojančios, o jų įtakų dozės galiai santykis priklauso nuo grindų storio, todėl grindų storiui viršijant 20 cm, priklausomybės pasidaro sudėtingesnės, be to, stebimas artėjimas prie tam tikros reikšmės. Taip yra todėl, kad didesnio storio grindyse didelę reikšmę turi spinduliuotės sugėrimas, kuris priklauso nuo sugeriamos spinduliuotės energijos. Sugertosios dozės galia priklauso ir nuo statybinių medžiagų tankio. Ši priklausomybė parodyta 3.40 paveiksle.



3.40 pav. Sugertosios dozės galios kambario centre ($\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$) priklausomybė nuo statybinės medžiagos tankio

Sugertosios dozės galia ore patalpoje mažėja, esant tiems patiems buto konstrukcinių elementų aktyvumams, bet keičiantis medžiagos tankiui. Modeliavimo rezultatai pateikti 3.41 paveiksle.



3.41 pav. Sugertosios dozės galios kambario centre ($\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$) priklausomybė nuo statybinės medžiagos tankio

Pateikti duomenys rodo, kokie svarbūs sugertosios dozės galiai, tuo pačiu ir efektinei dozei patalpose yra įvairūs statybinių medžiagų ir statybinių konstrukcijų parametrai.

Į vidinės modelinės patalpos pertvaras skaičiuojant dozės galią atsižvelgta nebuvo. Tokių pertvarų įtaka dozės galiai ir jos pasiskirstymui nėra didelė, ir tai rodo pasiskirstymai, pateikti 3.42 paveiksle. Parametrai, naudoti vidinei pertvarai aprašyti, pateikti 3.21 lentelėje.

3.21 lentelė. Modeliavimui naudoti vidinės pertvaros parametrai

Parametras	Parametro reikšmė
Pertvaros jungiamos sienos	Ilgosios sienos modelinės patalpos viduryje (2 ir 4)
Statybinės medžiagos tankis, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2,35
Pertvaros storis, cm	7
^{226}Ra savitasis aktyvumas, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$	56
^{214}Pb , ^{214}Bi savitieji aktyvumai, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$	26
^{228}Ac , ^{212}Pb savitieji aktyvumai, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$	25
^{208}Tl savitasis aktyvumas, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$	8,3
^{40}K savitasis aktyvumas, $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$	625

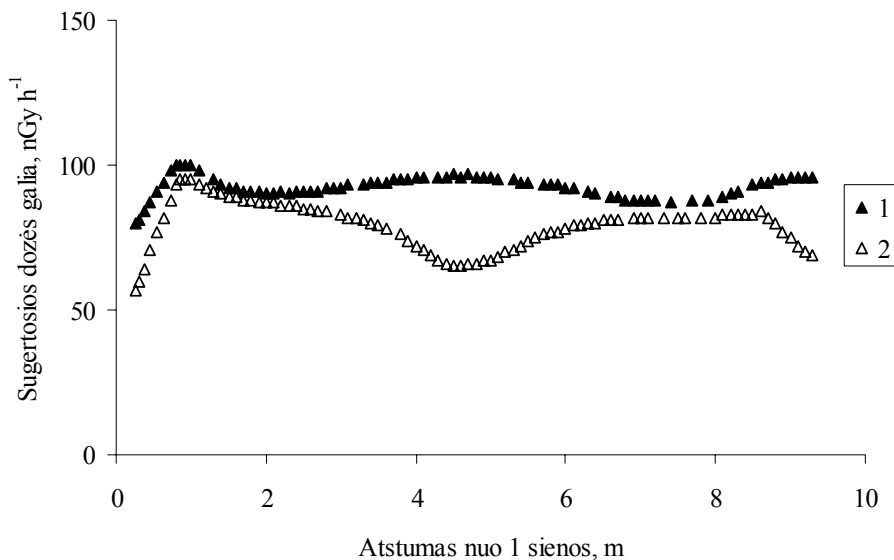
Vidinė pertvara yra 8 cm storio ir iš to paties betono kaip išorinės sienos.

Dozės galios skaičiuotos dviem atvejais – kai pertvaroje gamtinės kilmės radionuklidų aktyvumai yra tokie pat kaip išorinių sienų ir kai pertvaroje radionuklidų nėra, o ji sugeria išorinių sienų, grindų ir lubų radionuklidų skleidžiamą spinduliuotę.

Vidutinė sugertosios dozės galia, kai pertvaroje gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai yra tokie pat, kaip išorinėse sienose, yra $100 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$. Vidutinė sugertosios dozės galia

yra $87 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$, kai šioje pertvaroje radionuklidų nėra ir laikoma, jog pertvara spinduliuotę tik sugeria.

Pertvaros su radionuklidais ir be jų įtaka palyginta 3.42 paveiksle, kur parodyta, kaip abiem atvejais kinta sugertosios dozės galia linijoje, jungiančioje 1 ir 3 sienas ir einančioje patalpos viduriu 1,25 m aukštyje virš grindų.



3.42 pav. Sugertosios dozės galios kitimas linijoje, jungiančioje 1 ir 3 sienas ir einančioje patalpos viduriu ir esančioje horizontalioje plokštumoje 1,25 m aukštyje nuo grindų, kai bute yra 8 cm storio betoninė pertvara. 1 – kai betoninėje pertvaroje esančių radionuklidų savitieji aktyvumai yra tokie patys kaip išorinėse sienose, 2 – kai betoninėje pertvaroje nėra radionuklidų

Pateikti pasiskirstymai ir rezultatai rodo, kad pertvara, ypač jeigu laikoma, kad joje radionuklidų yra, dozės galios pasiskirstymui patalpoje didelės įtakos neturi. Taip yra todėl, kad pertvaros, kaip papildomos apšvitos šaltinio įtaką kompensuoja pertvaros, kaip nuo išorinėse konstrukcijose esančių radionuklidų spinduliuotės saugančio ekrano, įtaka. Laikant, kad pertvaroje radionuklidų nėra, didžiausia pertvaros kaip ekrano įtaka stebima patalpos viduryje, t. y., prie pertvaros.

Tai leidžia daryti išvadą, jog modeliuojant dozes patalpose, galima atsižvelgti tik į išorines patalpos konstrukcijas, išskyrus atvejus, kai pertvarose esančių radionuklidų savitieji aktyvumai žymiai viršija savituosius aktyvumus išorinėse konstrukcijose arba kai pertvarų storiai yra artimi arba viršija išorinių statybinių konstrukcijų storius.

Išanalizuota atskiruose modelinės patalpos konstrukciniuose elementuose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės įtaka dozės galiai patalpoje. Šios analizės rezultatai pateikti 3.22 lentelėje. Siekiant nustatyti šią įtaką ir prie pačių konstrukcinių elementų, skaičiuota ne tik taške patalpos centre, bet ir 30 cm atstumu nuo sienų. Apskaičiuotos reikšmės pateikiamos taške, esančiame 1,25 m aukštyje nuo grindų.

3.22 lentelė. Atskiruose modelinės patalpos konstrukciniuose elementuose esančių radionuklidų spinduliuotės įtaka dozės galiai įvairiuose patalpos taškuose 1,25 m aukštyje nuo grindų

Konstrukcijos elementas	Radionuklidų, esančių konstrukcijos elemente, įtaka dozės galiai, %		
	patalpos centre	50 cm atstumu nuo 4 sienos ties sienos viduriu	50 cm atstumu nuo 1 sienos ties sienos viduriu
Grindys	35	24	24
Lubos	31	17	21
1 siena	5	3	39
2 siena	12	4	9
3 siena	4	2	1
4 siena	14	52	8

Viena apsaugos nuo apšvitos, kurią sukelia statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančioji spinduliuotė, priemonių yra statybinės konstrukcijos, kuriose yra radionuklidų, padengti kitomis statybinėmis medžiagomis, kuriose tokių radionuklidų aktyvumai yra mažesni. Buvo atlikti skaičiavimai, siekiant nustatyti kaip pakistų dozės galia patalpoje, jos sienas padengus 4 cm storio tinko sluoksniu. Laikyta, kad tinke radionuklidų nėra. Gauta, kad tokiu atveju dozės galia patalpos centre būtų $81 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$, kai dozės galia be tinko sluoksnio – $88 \text{ nGy}\cdot\text{h}^{-1}$. Matyti, kad toks tinko sluoksnis dozės galia, o tuo pačiu ir gaunamą dozę sumažina apie 10 %. Tai reiškia, kad tokia apsaugos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų priemonė kai kuriais atvejais gali būti naudojama.

Iš rezultatų, pateiktų 3.22 lentelėje, matyti, kad didžiausią įtaką sugertosios dozės galiai patalpos centre turi grindys ir lubos. Taip yra dėl to, kad šie konstrukciniai elementai turi didžiausią paviršių. Jų įtaka sugertosios dozės galiai prie sienų irgi didelė, tačiau šiais atvejais didžiausią įtaką turi artimiausioje sienoje esantys radionuklidai. Įvairiuose konstrukciniuose elementuose esančių radionuklidų spinduliuotės įtaka priklauso tiek nuo to elemento dydžio, tiek nuo atstumo iki jo. Dėl šių priklausomybių sudėtingumo ir to, kad įtakos turi ir kiti konstrukciniai elementai, galima padaryti išvadą, jog dozės galios pasiskirstymo patalpoje modeliavimas yra sudėtingas.

3.22 lentelėje pateikta informacija apie visų radionuklidų bei jų skilimo produktų spinduliuotės įtaką dozės galiai. Kadangi statybinėse medžiagose esančių radionuklidų savitųjų aktyvumų santykiai gali būti įvairūs, svarbu ir tai, kokią įtaką dozės galiai turi įvairiose statybinėse konstrukcijose esantys radionuklidai. Šios įtakos įvertinimo rezultatai pateikti 3.23 lentelėje. Skaičiuota taškui, esančiam 1,25 m aukštyje nuo grindų modelinės patalpos centre. ^{226}Ra ir ^{232}Th įtaka skaičiuota kartu su jo skilimo produktų įtaka.

3.23 lentelė. Įvairių radionuklidų, esančių įvairiuose modelinės patalpos konstrukcijos elementuose, jonizuojančiosios spinduliuotės įtaka dozės galiai

Konstrukcijos elementas	Radionuklidų, esančių konstrukcijos elemente, įtaka dozės galiai, %		
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Grindys	10,7	11	15,3
Lubos	7,5	8,3	11,7
1 siena	1,4	1,6	2,4
2 siena	2,4	3,6	6,2
3 siena	1,0	1,1	1,8
4 siena	3,5	4,2	6,2
Visi konstrukcijos elementai	27	30	44

Visų radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės įtaka sugertosios dozės galiai patalpos centre yra panaši, nors galima konstatuoti, jog didžiausią įtaką turi ⁴⁰K spinduliuotė, nežiūrint į tai, jog buvo atsižvelgta ir į ²²⁶Ra ir ²³²Th skilimo produktų skvarbiają spinduliuotę. Taip yra dėl to, kad ⁴⁰K savitasis aktyvumas yra didžiausias ir jo gama spinduliuotė pasižymi dideliu skvarbumu, todėl ji mažiau sugerama statybinėse konstrukcijoje, kuriose yra jos šaltinis.

Standartinėje patalpoje, pastatytoje iš betono, kuriame yra tipiniai mūsų šaliai gamtinės kilmės radionuklidų aktyvumai, svarbiausias apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinis yra ⁴⁰K. Kitokiose statybinėse medžiagose ⁴⁰K savitieji aktyvumai gali būti mažesni, todėl galimi atvejai, kad pagrindinis apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinis bus kurio nors kito gamtinės kilmės radionuklido spinduliuotė.

Svarbu žinoti, kokią įtaką apšvitai turi vienetinis vieno ar kito radionuklido savitasis aktyvumas statybinėse medžiagose. Be to, nustatant normavimui naudojamą aktyvumo rodiklį, atsižvelgiama į dozės koeficientus. Todėl buvo įvertinta, kokią įtaką dozės galiai modelinės patalpos centre turės vienodi (vienetiniai) visų trijų radionuklidų ir jų skilimo produktų savitieji aktyvumai. Įvertinimo rezultatai pateikti 3.24 lentelėje.

3.24 lentelė. Sugertosios dozės galios reikšmės vienetiniam įvairių radionuklidų aktyvumui (dozės koeficientai) dviejų kambarių buto centre 1,25 m aukštyje nuo grindų

Dviejų kambarių buto apibūdinimas	Dozės koeficientas, (nGy·h ⁻¹)/(Bq·kg ⁻¹), nulemtas:		
	²²⁶ Ra ir skilimo produktų	²³² Th ir skilimo produktų	⁴⁰ K
Betono sienos ir kiaurymėtos plokščių perdangos, matmenys (9×6×2,5) m ³	0,88	1,04	0,067

Dozės koeficientai yra labai svarbūs skaičiuojant dozes, kadangi naudojantis jais galima pereiti nuo nesunkiai išmatuojamų radionuklidų savitųjų aktyvumų prie kur kas sunkiau nustatomų, tačiau statybinių medžiagų tinkamumo radiacinės saugos požiūriu įvertinimui svarbesnių efektinių dozių. Dėl tos priežasties dozės koeficientai yra nustatyti ne viename darbe.

Atskiruose darbuose gautų dozės koeficientų palyginimas pateiktas 3.25 lentelėje. Siekiant suvienodinti palyginimo sąlygas, naudoti koeficientai, gauti $(4 \times 5 \times 2,8) \text{ m}^3$ patalpoje, kurios grindys, lubos ir sienos yra iš 20 cm betono, kurio tankis $2,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Koeficientai skaičiuoti taškui esančiam patalpos centre 1,25 m aukštyje virš grindų. Šie koeficientai nuo koeficientų, pateiktų 3.24 lentelėje, skiriasi todėl, kad skiriasi abiejų patalpų matmenys ir statybinių konstrukcijų storiai.

3.25 lentelė. Sugertosios dozės galios ore reikšmės vienetiniam kiekvieno radionuklido savitajam aktyvumui (dozės koeficientai) modelinio kambario, kurios dydis $(4 \times 5 \times 2,8) \text{ m}^3$, ir kurios grindys, sienos ir lubos yra iš 20 cm storio betono, kurio tankis $2,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

Modelis	Dozės koeficientas, $(\text{nGy} \cdot \text{h}^{-1})/(\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1})$, nulemtas:		
	^{226}Ra su skilimo produktais	^{232}Th su skilimo produktais	^{40}K
Gautas šiame darbe*	1,08	1,12	0,068
(Koblinger, 1978)	0,79	0,89	0,070
(Stranden, 1979)	0,79	0,96	0,070
(Mustonen, 1985)	0,922	1,10	0,0806
(Markkanen, 1995)	0,908	1,06	0,0767
(Mirza, 1991)	0,954	1,208	0,081
(Ahmad, 1998)	1,2	1,29	0,1
(Maduar, 2004)	0,70	0,92	0,072
Kitų darbų vidurkis	0,89	1,06	0,0786

* – skaičiavimams buvo naudoti gamtinių radionuklidų savitieji aktyvumai betone, gauti šiame darbe ir taip pat naudoti skaičiuojant dviejų kambarių buto modelyje

Matyti, kad šiame darbe gauti dozės koeficientai patalpai, kurios dydis $(4 \times 5 \times 2,8) \text{ m}^3$, ir kuri yra iš 20 cm storio betono sienų, grindų ir lubų artimi koeficientams, gautiems tokiai pat patalpai kituose darbuose. Šiame darbe gauti dozės koeficientai nuo kitų 3.25 lentelėje nurodytų darbų dozės koeficientų vidurkių skiriasi: 5 % (^{232}Th) ir 2 % (^{40}K). Didesnis skirtumas (17 %) gautas ^{226}Ra . To priežastis gali būti tai, jog kituose darbuose buvo laikoma, jog ^{226}Ra yra pusiausvyroje su ^{222}Rn skilimo produktais. Tačiau tyrimai rodo, kad taip nėra, nes dalis ^{222}Rn patenka į statybinių konstrukcijų išorę ir jose ^{222}Rn skilimo produktų savitieji aktyvumai yra mažesni. Šiame darbe į tai buvo atsižvelgta, todėl galima teigti, jog gautas ^{226}Ra dozės koeficientas yra tikslesnis.

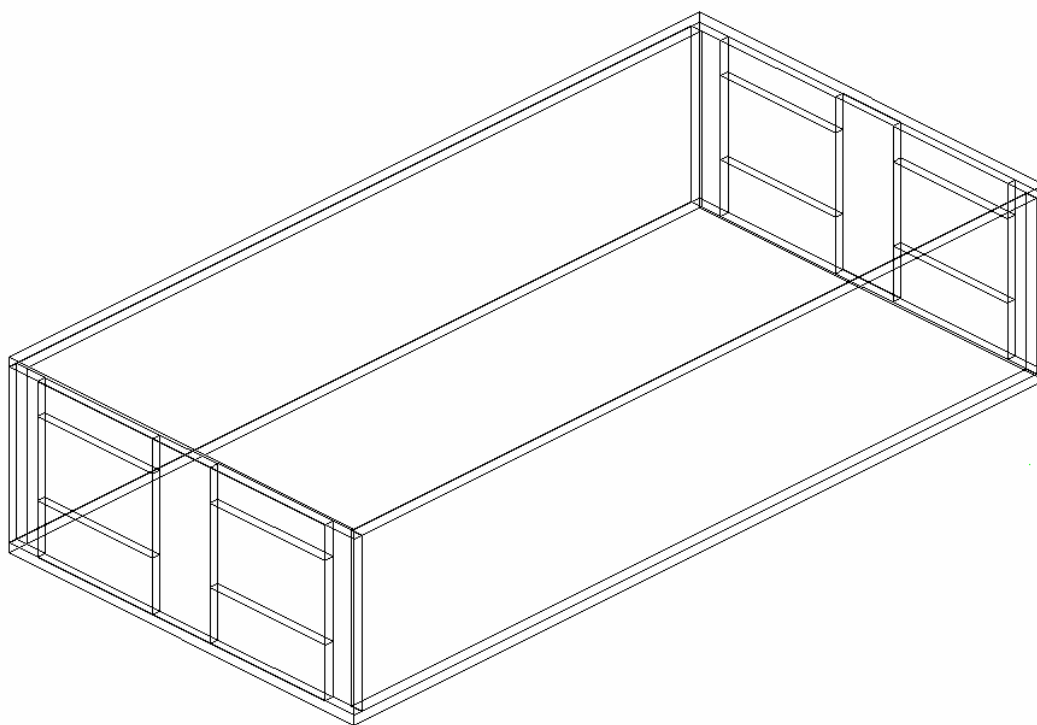
Tai rodo, kad naudotas dozių skaičiavimo modelis yra lankstesnis ir tinka apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozėms įvertinti. Svarbu tai, jog šį modelį galima naudoti bet kokios geometrijos patalpoms, pastatytoms iš bet kokių konstrukcijų su bet kokiais savitaisiais radionuklidų aktyvumais. Programos „VISIPLAN-3D“ lankstumas duoda galimybę ją įvertinti apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozes ir statybinių medžiagų tinkamumui radiacinės saugos požiūriu nustatyti.

Vienas svarbiausių parametru, turinčių įtakos dozės galiai patalpoje, yra jos matmenys. Tai rodo duomenys, gauti modeliuojant dozės galios pasiskirstymą patalpoje, kurios parametrai pateikti 3.21 lentelėje. Šios patalpos parametrai panašūs į parametrus, naudotus modeliuojant (Mustonen, 1985). Ši patalpa siekiant atskirti ją nuo modelinės patalpos, kurios parametrai pateikti 3.26 lentelėje, pavadinta alternatyviaja.

3.26 lentelė. Alternatyviosios patalpos parametrai, naudoti skaičiuojant sugertosios dozės galią

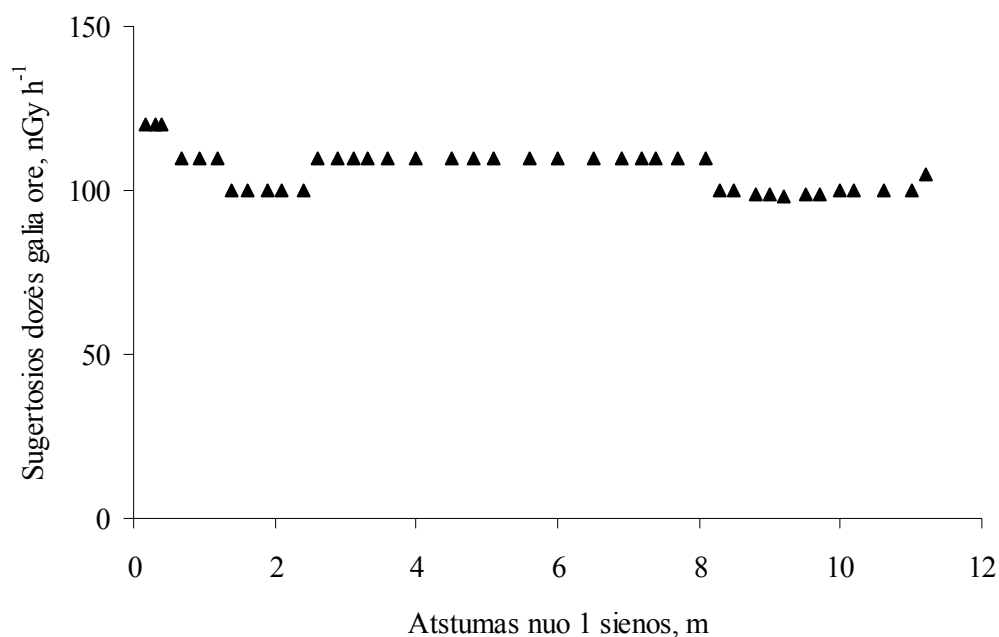
Parametras	Parametro reikšmė
Patalpos matmenys (ilgis $\times$ plotis $\times$ aukštis), m ³	12 $\times$ 6 $\times$ 2,5
Trumpųjų sienų storis, cm	13
Ilgųjų sienų storis, cm	18
Sienų, lubų ir grindų statybinė medžiaga	betonas
Sienų, lubų ir grindų statybinės medžiagos tankis, g·cm ⁻³	2,35
Grindų ir lubų storis, cm	14
Langų matmenys (plotis $\times$ aukštis), m ²	2 $\times$ 1,2
Langų aukštis nuo grindų, m	0,8
²²⁶ Ra, ²¹⁴ Pb, ²¹⁴ Bi savitasis aktyvumas, Bq·kg ⁻¹ – sienose, grindyse, lubose	33
²³² Th grandinės (²²⁸ Ac, ²¹² Pb) savitasis aktyvumas, Bq·kg ⁻¹ – sienose, grindyse, lubose	34
²⁰⁸ Tl savitasis aktyvumas, Bq·kg ⁻¹ – sienose, grindyse, lubose	11,3
⁴⁰ K savitasis aktyvumas, Bq·kg ⁻¹ – sienose, grindyse, lubose	800

Alternatyviosios patalpos brėžinys parodytas 3.43 paveiksle.



3.43 pav. Schematinis alternatyviosios patalpos vaizdas

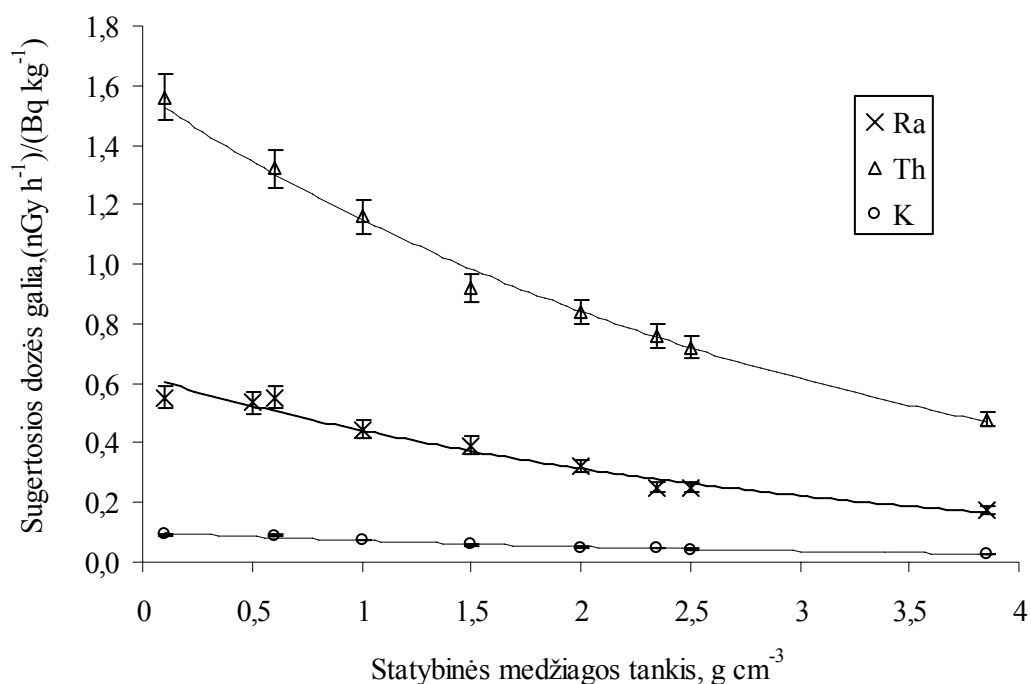
Modeliavimo šioje patalpoje rezultatai – sugertosios dozės galios kitimas horizontalioje plokštumoje, linijoje tarp trumpųjų sienų – pateiktas 3.44 paveiksle.



3.44 pav. Sugertosios dozės galios kitimas linijoje, jungiančioje trumpąsias sienas, einančioje patalpos viduriu ir esančioje horizontalioje plokštumoje 1,25 m aukštyje nuo grindų

Dozės galios pasiskirstymai modelinėje ir alternatyviojoje patalpoje skiriasi. Taip yra dėl to, kad skiriasi šių patalpų matmenys ir kiti parametrai, nuo kurių priklauso apšvitos šaltinio geometrija – radionuklidų, esančių statybinėse konstrukcijose, išsidėstymas. Visa tai rodo, kokią didelę įtaką dozėms turi tai, kaip patalpos yra pastatytos, o tai komplikuoja galimų dozių tabuliavimo – jų skaičiavimo pagal iš anksto užduotus parametrų rinkinius – užduotį. Taip tabuliuojant galimas dozes, reikėtų daug skaičiavimų, kadangi būtų daug parametrų, nuo kurių dozės priklauso, rinkinių. Dėl šios priežasties tabuliavimo rezultatai (galimos dozės) būtų retai panaudojami. Todėl esant būtinybei yra optimalu yra kas kartą atlikti galimų dozių skaičiavimus. Tik tokiu atveju būtų galima atsižvelgti į visus parametrus, nuo kurių dozės galia priklauso.

Kaip minėta, sugertosios dozės galia priklauso ir nuo statybinių medžiagų tankio. Buvo gauta dozės koeficientų priklausomybė nuo tankio, kuri pateikta 3.45 paveiksle.



3.45 pav. Apšvitos nuo įvairių radionuklidų vienetinio savitojo aktyvumo jonizuojančiosios spinduliuotės sugertosios dozės galios koeficientų priklausomybė nuo statybinės medžiagos tankio

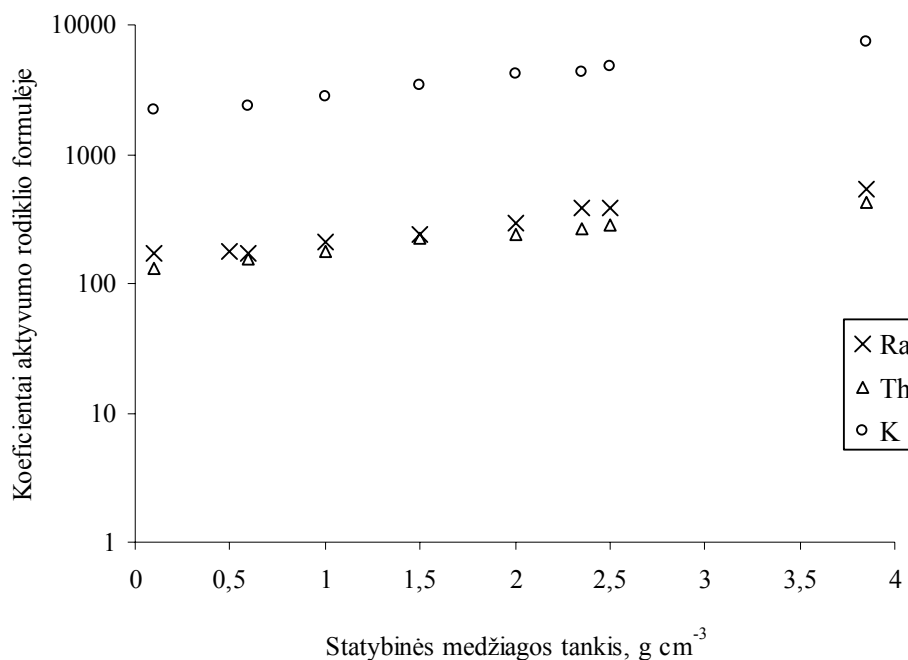
Aktyvumo rodiklio formulė (1.4), naudojama statybinėms medžiagoms įvertinti radiacinės saugos požiūriu, apskaičiuota $(4 \times 5 \times 2,8) \text{ m}^3$ kambariui, sienų storis 20 cm, tankis $2,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Mūsų šalyje standartiniai butai yra kitokie. Todėl (1.4) formulėje pateikiami dalikliai būtų skirtingi, kadangi šie dalikliai priklauso nuo dozės koeficientų, kurie priklauso nuo patalpų geometrijos.

Šie dalikliai priklauso ir nuo statybinių medžiagų tankio. Atlikus dozės priklausomybės nuo statybinių medžiagų tankio skaičiavimus, gauti (1.4) formulės dalikliai, kurie pateikiami 3.27 lentelėje. Joje palyginimui nurodyti dabar naudojami dalikliai, gauti kambario modeliui $(4 \times 5 \times 2,8) \text{ m}^3$, kurio statybinių medžiagų tankis yra $2,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

3.27 lentelė. Aktyvumo rodiklio formulės koeficientai arba leistinas radionuklido aktyvumas, kad statybinę medžiagą būtų galima naudoti be apribojimų.

Statybinės medžiagos tankis, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	Dalikliai, kurie naudojami dalinti radionuklidų savituosius aktyvumus		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
0,1	369	131	2198
0,6	369	155	2318
1,0	457	176	2772
1,5	519	222	3446
2,0	635	243	4113
2,35	816	268	4250
2,5	816	283	4722
3,85	1166	425	7500
Dabar naudojami dalikliai	300	200	3000

Kaip matyti, šie dalikliai skiriasi net tada, kai statybinių medžiagų tankis yra $2,35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. To priežastis – skirtinga patalpų geometrija (matmenys). Grafiškai ši priklausomybė pateikta 3.46 paveiksle.



3.46 pav. Radionuklidų koeficientų aktyvumo rodiklio formulėje priklausomybė nuo statybinės medžiagos tankio

Dozės koeficientai priklauso nuo statybinių medžiagų, kadangi jos turi skirtingus tankius. Šie koeficientai kai kurioms dažniausiai naudojamoms statybinėms medžiagoms pateikti 3.28 lentelėje.

3.28 lentelė. Sugertosios dozės galios koeficientai kai kurioms statybinėms medžiagoms.

Statybinės medžiagos	Tankis, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	Dozės koeficientas, $(\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1})/(\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1})$, nulemtas:		
		^{226}Ra ir jo skilimo produktų	^{232}Th ir jo skilimo produktų	^{40}K
Perlito plastbetonis, birioji akmens vata	0,1	0,55 – 1,19	1,56	0,093
Akytieji betonai, poringas betonas, keramzitbetonis su keramzitinio smėliu, putų keramzitbetonis	0,6	0,55 – 1,19	1,32	0,088
Akytieji betonai, silikatai, tuščiaviduriai keraminiai blokai, keramzitbetonis su perlitinio smėliu	1,0	0,45 – 0,96	1,16	0,074
Akmens gaminiai	1,5	0,39 – 0,85	0,92	0,059
Plytos	2,0	0,32 – 0,69	0,84	0,050
Betonas	2,35	0,25 – 0,54	0,76	0,048
Gelžbetonis	2,5	0,25 – 0,54	0,72	0,043
Ilmenito betonas	3,85	0,18 – 0,38	0,48	0,027

Formulė (1.4) statybinių medžiagų tinkamumą radiacinės saugos požiūriu įvertina tik apytiksliai. Didelę reikšmę galimoms apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų

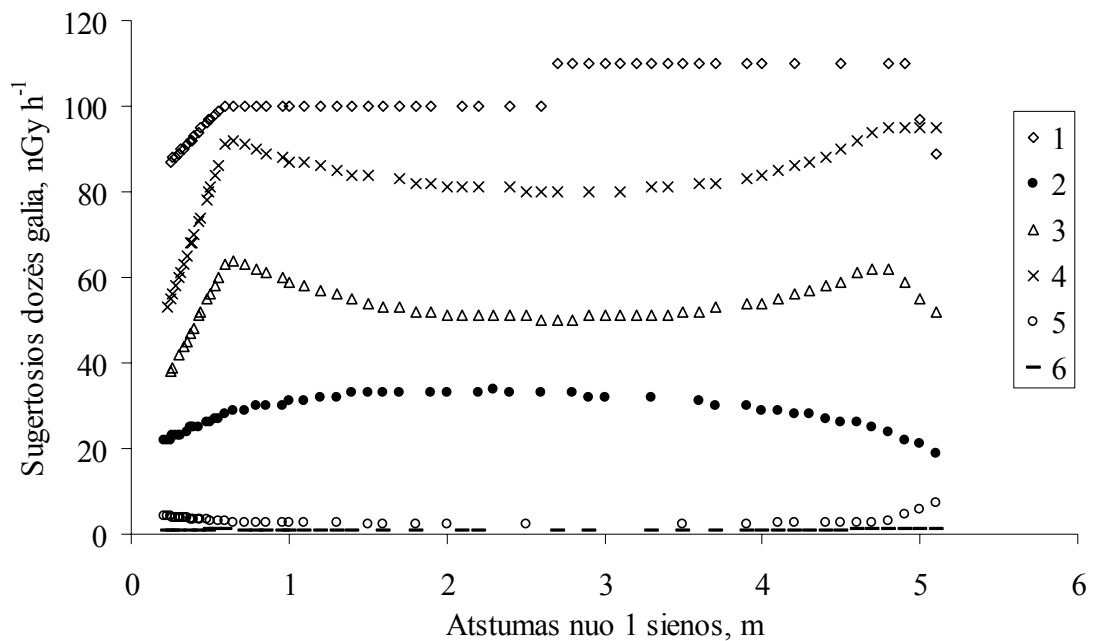
jonizuojančiosios spinduliuotės dozėms turi ne tik šių radionuklidų savitieji aktyvumai, bet ir kiti parametrai. Kai patalpos atskiri konstrukciniai elementai (sienos, lubos, grindys) yra iš skirtingų statybinių medžiagų, kai skiriasi jų tankiai, radionuklidų aktyvumai jose, išsidėstymas žmogaus atžvilgiu (skirtinga jų kaip šaltinio, lemiančio žmogaus apšvitą, konfigūracija), tada skiriasi dozės koeficientai (3.29 lentelė) ir dozės galios pasiskirstymas patalpoje (3.47 paveikslas).

3.29 lentelė. Sugertosios dozės galios koeficientai, kai modelinis kambarys ($4 \times 5 \times 2,8$) m³ yra iš skirtingų statybinių medžiagų.

Kambario konstrukcinių elementų aprašymas	Savitasis aktyvumas, Bq·kg ⁻¹				Dozės koeficientas, (nGy·h ⁻¹)/(Bq·kg ⁻¹)		
	²²⁶ Ra	²²⁶ Ra skilimo produktai ²¹⁴ Pb, ²¹⁴ Bi	²³² Th ir skilimo produktai	⁴⁰ K	²²⁶ Ra skilimo grandinės	²³² Th skilimo grandinės	⁴⁰ K
Visas kambarys betoninis*	56	26	25	625	1,042	1,184	0,076
Visas kambarys betoninis	83	39	38	1050	1,046	1,171	0,079
Sienos betoninės, lubos ir grindys medinės**	56	26	25	625 80	0,52	0,65	0,042
Sienos ir grindys betoninės, lubos medinės	56	26	25	625 80	0,84	0,97	0,064
Sienos ir lubos medinės, grindys betoninės	56	26	25	625 80	0,56	0,67	0,041
Kambarys medinis				27			0,032
Kambarys medinis				80			0,032

* – betono tankis 2,35 g·cm⁻³, ** – medienos tankis 0,6 g·cm⁻³.

Matyti, kad kuo daugiau kambaryje konstrukcinių elementų iš medžio, tuo dozės koeficientų reikšmės yra mažesnės. Šios reikšmės nepriklauso nuo radionuklidų savitųjų aktyvumų konstrukcijose. Tai rodo, kad dozės galia nuo radionuklidų savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose priklauso tiesiškai. Šis rezultatas yra svarbus metodiniu požiūriu, kadangi dozės galios priklausomybė nuo radionuklido savitojo aktyvumo plačiame šio aktyvumo reikšmių intervale gali įgauti netiesinį pavidalą. 3.29 lentelėje pateikiami modeliavimo rezultatai rodo, kad radionuklidų savitųjų aktyvumų reikšmių, kurios paprastai būna statybinėse medžiagose, intervale galima naudoti šiuo modeliu nustatytas dozės koeficientų reikšmes (15A).



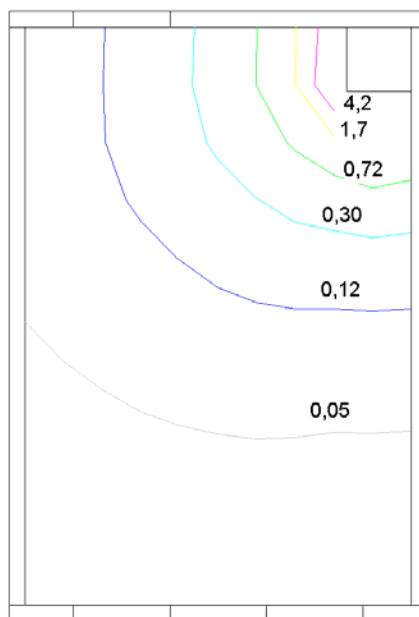
3.47 pav. Sugertosios dozės galios kitimas išilgai linijos, einančios per standartinio kambario vidurį 1,25 m aukštyje nuo grindų, kai: 1 – visi konstrukciniai elementai iš betono, 2 – sienos, lubos medinės, grindys betoninės, 3 – betoninės sienos ir lubos, grindys medinės, 4 – sienos, grindys betoninės, lubos medinės, 5 – medinės sienos, lubos ir grindys ($^{40}\text{K} - 80 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$), 6 – medinės sienos, lubos ir grindys ($^{40}\text{K} - 27 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Visi aptarti parametrai turi reikšmės nustatant statybinių medžiagų tinkamumą radiacinės saugos požiūriu. Kaip svarbu atsižvelgti į šiuos parametrus, rodo pateiktas pavyzdys. Jame parodomi galimų dozių įvertinimo rezultatai, gauti analizuojant, kokia bus apšvitos nuo keraminėje kriauklėje esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozė. Duomenys apie šią kriauklę yra šie:

- matmenys $(100 \times 100 \times 40) \text{ cm}^3$,
- radionuklidų aktyvumai ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$):
 - ^{226}Ra skilimo grandinės – 215,
 - ^{232}Th skilimo grandinės – 144,
 - ^{40}K – 876.

Šios kriauklės radionuklidų aktyvumo rodiklis viršija 1 (1,73).

Laikyta, kad kriauklė yra kampe tarp betoninių sienų. Kadangi vertinta tik apšvitos nuo radionuklidų, esančių kriauklėje, jonizuojančiosios spinduliuotės dozė, į radionuklidus, esančius šioje sienoje ir kituose patalpos konstrukcijos elementuose, neatsižvelgta, t. y., laikyta, kad gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai juose lygūs 0. Taip padaryta siekiant išskirti kriauklėje esančių radionuklidų įtaką sugertosios dozės galiai. Taip būtų daroma, siekiant įvertinti tokios kriauklės priimtinumą radiacinės saugos požiūriu – tada būtų skaičiuojama, kokia būtų papildoma apšvitos nuo analizuojamoje kriauklėje esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozė. Dozės galios pasiskirstymas apie šią kriauklę pateiktas 3.48 paveiksle.



3.48 pav. Sugertosios dozės galios ore ($\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$) pasiskirstymas aplink kriauklę horizontalioje plokštumoje 1,25 m aukštyje nuo grindų

Iš 3.48 paveiksle pateiktų modeliavimo rezultatų matyti, kad metinė dozė pačiomis nepalankiausiomis sąlygomis (žmogus prie pat kriauklės būna 80 % viso laiko, t. y., tiek, kiek patalpose) yra $2,5\cdot 10^{-8}$ mSv. Ši dozė yra gerokai mažesnė už nereguliuojamąjį lygį (0,1 mSv per metus), kurio neviršijus jokių radiacinės saugos priemonių imtis nereikia.

Nors kriauklės radionuklidų aktyvumo rodiklis viršija 1, detalesni dozių skaičiavimo rezultatai rodo, jog naudoti tokią kriauklę apšvitos nuo joje esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės požiūriu galima. Tai yra įrodymas, kaip svarbu iškilus būtinybei įvertinti apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozes, ir remiantis šio įvertinimo rezultatais, nuspręsti apie statybinių medžiagų tinkamumą radiacinės saugos požiūriu.

Apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozių skaičiavimas yra efektyvi priemonė, padedanti optimizuoti radiacinę saugą. Tokius skaičiavimus atlikti kiekvienai tiriamai statybinei medžiagai nėra prasmės. Pirminis statybinių medžiagų tinkamumo radiacinės saugos požiūriu įvertinimas atliekamas remiantis aktyvumo rodiklio skaičiavimo rezultatais. Jeigu aktyvumo rodiklis neviršija 1, statybines medžiagas galima naudoti be jokių apribojimų. Kadangi aktyvumo rodiklis nustatytas remiantis radiacinės saugos konservatyvumo principu (žr. 3.4 skyrių), toks įvertinimo būdas užtikrina, kad žmonių apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės bus tokios mažos, kokias galima pasiekti protingomis priemonėmis (radiacinės saugos optimizavimo principas).

Kai aktyvumo rodiklis artimas 1, nors jo dar neviršija, egzistuoja tam tikra tikimybė, kad tam tikro tos statybinių medžiagų partijos bandinių skaičiaus radionuklidų aktyvumo rodiklis 1 viršys (žr. 3.2 skyrių). Tačiau tikimybė, kad šiose apšvitos nuo šiose statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės viršys tam tikrus optimizuotus apšvitos lygius (ribotąsias dozes) yra maža, kadangi aktyvumo rodiklis nustatytas remiantis konservatyvumo principu. Todėl tol, kol aktyvumo rodiklis neviršija 1, visada galima laikyti, jog statybines medžiagas galima naudoti be apribojimų. Į tai, jog gali atsirasti tos pačios partijos statybinių medžiagų bandinių, kurių radionuklidų aktyvumo rodiklis viršys 1, reikia atsižvelgti tik tada, kai reikia kuo tiksliau numatyti galimas dozes, pavyzdžiui, analizuojant statybines medžiagas tų patalpų, kuriose foninės spinduliuotės intensyvumas turi būti kuo mažesnis, statybai. Tokių patalpų pavyzdys gali būti branduolinės spektrometrijos ar radiometrijos patalpos.

Aktyvumo rodikliui viršijus 1, būtina atsižvelgti į tai, kiek statybinių medžiagų patalpos statybai bus naudojama. Jeigu šis kiekis neviršija 10 % bendro statybinių medžiagų kiekio, aktyvumo rodiklis gali būti iki 2. Tokia nuostata remiasi tuo, kad apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozės priklauso ir nuo statybinių medžiagų kiekio, nuo kurio priklauso bendras apšvitos šaltinio aktyvumas.

Tuo atveju, kai statybinės medžiagos radionuklidų aktyvumo rodiklis viršija 1 ir patalpose ši medžiaga sudaro daugiau kaip 10 % bendro statybinių medžiagų kiekio, ir tuo atveju, kai šis kiekis neviršija 10 % bendro statybinių medžiagų kiekio, tačiau aktyvumo rodiklis viršija 2, būtina atlikti galimos dozės skaičiavimus. Parametrai, naudojami tokių skaičiavimų metu, turi būti kiek įmanoma tipiniai, tačiau tuo atveju, kai analizuojamą statybinę medžiagą planuojama naudoti tam tikromis sąlygomis (pavyzdžiui, tam tikrų matmenų patalpų statybai), reikia atsižvelgti į šių parametrų specifiškumą.

Programa „VISIPLAN-3D“ gali būti viena iš galimų alternatyvų, ypač dėl to, kad jos tikslumas ir patikimumas įrodytas atliekant apšvitos nuo dirbtinės kilmės radionuklidų atominės energetikos objektuose dozių skaičiavimus.

Taigi, apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozių įvertinimui galima naudoti įvairias metodikas ir programas, kurios skirtos dozėms nuo sudėtingos geometrijos apšvitos šaltinių įvertinti. Būtina žinoti naudojamų metodikų ir programų savybes, stipriąsias ir silpnąsias puses ir į tai atsižvelgti analizuojant tokio įvertinimo rezultatus ir juos interpretuojant.

Tokia statybinių medžiagų vertinimo radiacinės saugos požiūriu seka – aktyvumo rodiklis – naudojamas statybinės medžiagos kiekis – galimos apšvitos modeliavimas – yra optimali. Palyginus su anksčiau taikytu ir kai kuriose šalyse vis dar taikomu būdu, kai statybinių

medžiagų įvertinimui naudojamosi tik aktyvumo rodikliu, minėta seka suteikia mažiausiai vieną privalumą – lankstumą. Svarbu ir tai, kad vertinant didelės dalies statybinių medžiagų tinkamumą radiacinės saugos požiūriu, taikomas tas pats aktyvumo rodiklio principas, todėl teigti, kad naujasis vertinimo principas yra daug sudėtingesnis už senąjį, nėra jokio pagrindo. Žinoma, skaičiuoti apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės dozes gana sudėtinga, be to, tam reikia programinės įrangos. Tačiau toks sudėtingesnis būdas duoda ekonominį efektą, kadangi juo parodoma, jog statybinių medžiagų, kurias naudoti pagal aktyvumo rodiklį būtų draudžiama, naudojimas iš tikrųjų yra optimizuotas.

3.7. Išvados

1. Nustatyta, kad gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai Lietuvoje gaminamose ir naudojamose statybinėse medžiagose yra plačiose ribose – kai kurių medžiagų radionuklidų aktyvumo rodikliai yra artimi 4.
2. Žymios statybinių medžiagų taršos dirbtinės kilmės radionuklidais nenustatyta. Esant didžiausiam vienintelio aptikto dirbtinės kilmės radionuklido Cs^{137} savitajam aktyvumui, užregistruotam medienos bandiniuose, šio radionuklido jonizuojančioji spinduliuotė lemtų apie 0,8 % sugertosios dozės galios, išmatuotos mediniuose namuose, vidurkio.
3. Atlikta statybinių medžiagų klasifikacija galimos apšvitos nuo jose esančių gamtinės kilmės radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės požiūriu.
4. Įvertintos tipinės sugertosios dozės galios reikšmės pastatuose, pastatytuose iš įvairių statybinių medžiagų ir nustatyta, kad jos tiesiogiai susijusios su statybinių medžiagų radionuklidų aktyvumo rodikliu – sugertosios dozės galios priklausomybės nuo aktyvumo rodiklio aproksimacijos tiesės polinkio koeficientas, neatsižvelgus į kosminės spinduliuotės įtaką sugertosios dozės galiai, yra $44 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$, atėmus apšvitos nuo kosminės spinduliuotės dozės galią – $68 \text{ nGy} \cdot \text{h}^{-1}$.
5. Įvertinti gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai archeologiniuose statybinių medžiagų bandiniuose. Vidutinis archeologinių molio plytų aktyvumo rodiklis yra $(0,69 \pm 0,02)$, šiuolaikinių – $(0,86 \pm 0,03)$.
6. Nustatytos tikimybės, kad dėl statistinės tyrimų metu gautų rezultatų prigimties radionuklidų aktyvumo rodiklis viršys 1, nors atskirų statybinių medžiagų iš tos pačios partijos bandinių ar net to paties bandinio mėginių radionuklidų aktyvumo rodikliai 1 neviršija.
7. Nustatyti tipiniai ore sugertosios dozės galios ir radono tūrinių aktyvumų patalpose ryšio koeficientai, kurie skirtingoms patalpoms gali skirtis daugiau kaip 30 kartų. Radono

skilimo produktų spinduliuotės patalpose įtaka sugertosios dozės galiai neviršija kelių procentų.

8. Programa „VISIPLAN-3D“ atliktas apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių gamtinės kilmės radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės modeliavimas. Palyginus su kitais modeliais, „VISIPLAN-3D“ suteikia galimybę atsižvelgti į specifines sąlygas patalpose, nuo kurių priklauso minėta apšvita.
9. Sugertosios dozės galia patalpos ore priklauso nuo to, iš kokių statybinių medžiagų patalpa pastatyta. Dozės koeficientų reikšmės nuo radionuklidų aktyvumų statybinėse medžiagose nepriklauso.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Išanalizavus faktorius, nuo kurių priklauso apšvita nuo statybinėse medžiagose esančių gamtinės kilmės radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės, Lietuvoje naudojamos statybinės medžiagos radiologiniu požiūriu buvo suklasifikuotos į aštuonias klases pagal tris požymius: 1. juose esančių radionuklidų savituosius aktyvumus, 2. kiekius, kuriais jos naudojamos, 3. vietas, kur jos naudojamos, žmogaus atžvilgiu.
2. Nustatyta, kad gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai Lietuvoje gaminamose ir naudojamose statybinėse medžiagose kinta plačiose ribose: ^{226}Ra – nuo $0,6 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ iki $1030 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, ^{232}Th – nuo $0,2 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ iki $426 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, ^{40}K – nuo $1,1 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ iki $4690 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$.
3. Nustatyta, kad gamtinės kilmės radionuklidų Lietuvoje gaminamose ir naudojamose statybinėse medžiagose aktyvumo rodikliai daugiausiai kinta nuo 0,25 iki 0,55, tačiau atskirais atvejais gali siekti 3,78.
4. Įsitikinta, kad Lietuvoje gaminamose ir naudojamose statybinėse medžiagose esant didžiausiam vienintelio aptikto dirbtinės kilmės radionuklido ^{137}Cs savitajam aktyvumui, užregistruotam medžio bandiniuose, šio radionuklido jonizuojančioji spinduliuotė lemtų apie 0,8 % dozės, kurią lemia gamtinių radionuklidų, esančių statybinėse medžiagose, jonizuojančioji spinduliuotė.
5. Nustatyta, kad sugertosios dozės galia įvairių pastatų patalpose priklauso nuo radionuklidų savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose. Mūsų šalyje metinė efektinė dozė patalpose, pastatytose iš statybinių medžiagų su aktyvumo rodikliu, lygiu 1, būtų (0,3 – 0,6) mSv.
6. Nustatyti ^{222}Rn tūriniai aktyvumai ir jų kaita patalpų ore bei įtaka sugertosios dozės galiai rodo, kad sugertosios dozės galia priklauso ir nuo patalpų charakteristikų. Dozės

koeficientai įvairioms patalpoms gali skirtis iki 30 kartų. Radono skilimo produktų patalpose spinduliuotės įtaka sugertosios dozės galiai ore neviršija kelių procentų.

7. Modeliuojant sugertosios dozės galios kaitą ore, įvertinta patalpos parametrų (statybinių medžiagų tankio, patalpos konstrukcinių elementų storio, patalpos dydžio, apdailos medžiagų, vidinių pertvarų) įtaka gyventojų apšvitai.

REKOMENDACIJOS

1. Vien klasifikavimu įvertinti galimos apšvitos nuo statybinėse medžiagose esančių gamtinės kilmės radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės negalima – būtini šių radionuklidų savitųjų aktyvumų statybinėse medžiagose matavimai.
2. Dozės galios matavimai patalpose turėtų būti atliekami ne arčiau, kaip 1 m atstumais nuo sienų, grindų ir lubų.
3. Statybinių medžiagų tinkamumo radiacinės saugos požiūriu įvertinimas, kai naudojamosi ne tik jų radionuklidų aktyvumo rodikliai, bet ir, esant būtinybei, atliekant galimų apšvitos dozių skaičiavimus, yra efektyvus radiacinės saugos optimizavimo būdas, padedantis lanksčiau taikyti radiacinės saugos reikalavimų sistemą.
4. Apšvita nuo statybinėse medžiagose esančių radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės gali būti sumažinta kontroliuojant radionuklidų savituosius aktyvumus šiose medžiagose. Vienas iš tokios kontrolės būdų yra pakeisti statybines medžiagas medžiagomis, kuriose yra mažesni radionuklidų savitieji aktyvumai.
5. Apšvita nuo radono, išsiskyrusio iš statybinių medžiagų, gali būti mažinama gerinant patalpų vėdinimą ir padengiant vidinius patalpų paviršius (paprastai sienas) radonui nepralaidžia danga.

Literatūra

Abbadly, A.; Abbady, A. G. E.; Michel, R. Indoor radon measurement with the Lucas cell technique. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol 61, No 6, 2004, p. 1469–1475.

Abo-Elmagd, M.; Metwally, S. M.; Elmongy, S. A.; Salama, E.; El-Fiki, S. A. External and internal exposure to natural radiations inside ancient Egyptian tombs in Saqqara. *Radiation Measurements*, Vol 41, No 2, 2006, p. 197–200.

Ackers, J. G.; Bosnjakovic, B. F. M.; Strackee, L. Limitation of radioactivity of concentrations in building materials based on a practical calculation model. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 7, No 1–4, 1984, p. 413–416.

Ademola, J. A.; Farai, I. P. Annual effective dose due to natural radionuclides in building blocks in eight cities of Southwestern Nigeria. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 114, No 4, 2005, p. 524–526.

Ademola, J. A.; Oguneletu, P. O. Radionuclide content of concrete building blocks and radiation dose rates in some dwellings in Ibadan, Nigeria. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 81, No 1, 2005, p. 107–113.

Ahmad, N.; Hussein, A. J. A.; Aslam. Radiation doses in Jordanian dwellings due to natural radioactivity in construction materials and soils. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 41, No 2, 1998, p. 127–136.

Ahmed, N. K. Measurement of natural radioactivity in building materials in Qena city, Upper Egypt. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 83, No 1, 2005, p. 91–99.

Al-Ghorabie, F. H. H. Measurements of indoor gamma radiation dose in At-Taif city, Saudi Arabia using CaSO₄:Dy (TLD-900). *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 113, No 2, 2005, p. 178–184.

Al-Jarallah, M. I.; Fazal-ur-Rehman, Musazay, M. S.; Aksoy, A. Correlation between radon exhalation and radium content in granite samples used as construction material in Saudi Arabia. *Radiation measurements*, Vol 40, No 2–6, 2005, p. 625–629.

Al-Jarallah, M. Radon exhalation from granites used in Saudi Arabia. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 53, No 1, 2001, p. 91–99.

Amrani, D.; Tahtat, M. Natural radioactivity in Algerian building materials. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol 54, No 4, 2001, p. 687–696.

Anjos, R. M.; Veiga, R.; Soares, T.; Santos, A. M. A.; Aguiar, J.G.; Frascá, M. H. B. O.; Brage, J.A.P.; Uzeda, D.; Mangia, L.; Facure, A.; Mosquera, B.; Carvalho, C.; Gomes, P. R. S. Natural radionuclide distribution in Brazilian commercial granites. *Radiation Measurements*, Vol 39, No 3, 2005, p. 245–253.

Baetsle, L. H. Study of radionuclides contained in waste produced by the phosphate industry and their impacts of the environment. Report EUR 13262 EN, Nuclear Science, European Commission, Luxembourg, 1991 [žiūrēta 2006 m. sausio 17 d.]. Prieiga per internetą: <http://europa.eu.int/comm/energy/nuclear/publications/radioactive_waste_en.htm>

- Baeza, A.; Navarro, E.; Roldan, C.; Ferrero, J. L.; Juanes, D.; Corbacho, J. A.; Guillen, F. J. Indoor radon levels in buildings in the Autonomous Community of Extremadura (Spain). *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 103, No 3, 2003, p. 263–268.
- Bohicchio, F.; Campos Venuti, G.; Nuccetelli, C.; Piermattei, S.; Risica, S.; Tommasino, L.; Torri, G. Results of the representative Italian national survey on radon indoors. *Health Physics*, Vol 71, No 5, 1996, p. 741–748.
- Bohicchio, F.; Nuccetelli, C. A method to evaluate the contribution of building material to indoor gamma dose rate through outdoor measurements: preliminary results. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 111, No 4, 2004, p. 413–416.
- Botezatu, E.; Jacob, O.; Miron, C.; Gradinaru, M. Increased indoor radiation exposures – consequences of NORMs contained in building materials. High levels of natural radiation and radon areas: Radiation Dose and Health Effects (Proc. Conf. 2002). Vol 2, Rep. BfS-SCHR-24/2002, Bundesamt für Strahlenschutz, Neuherberg, 2002, p. 355–358.
- Burnett, W. C.; Coward, J. B.; LaRock, P.; Hull, C.D. Microbiology and radiochemistry of phosphogypsum. Florida Institute of Phosphate Research. Publ. No 05-035-115, FIPR, Bartow, FL, 1995, 25 p.
- Busto, J.; Gonin, Y.; Hubert, F.; Hubert, P.; Vuilleumier, J.-M. Radioactivity measurements of a large number of adhesives. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A* (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment). Vol 492, No 1–2, 2002, p. 35–42.
- Candarrelli, J. II.; Elliott, L.; Hornung, R.; Chan, W. P. Proposed model for estimation dose to inhabitants of ^{60}Co contaminated buildings. *Health Physics*, Vol 72, No 3, 1997, p. 351–360.
- Chang, W. P.; Nabyvanets, Y. B.; Min Hua Jen. Unusual ^{232}Th and ^{238}U contamination on some road surfaces in Taoyuan. *Health Physics*, Vol 80, No 6, 2001, p. 602–606.
- Chao, C. Y. H.; Tung, T. C. W. Radon emanation of building material – impact of back diffusion and difference between one-dimensional and two-dimensional tests. *Health Physics*, Vol 76, No 6, 1999, p. 675–681.
- Chauhan, R. P.; Chakarvarti, S. K. Effect of compaction on diffusion of radon through some building construction materials. *Nuclear Science Journal*, Vol 38, No 6, 2001, p. 415–435.
- Chauhan, R. P.; Chakarvarti, S. K. Radon diffusion through soil and fly ash: effect of compaction. *Radiation measurements*, Vol 35, No 2, 2002, p. 143–149.
- Chauhan, R. P.; Kant, K.; Mahesh, K.; Chakarvarti, S. K. Radon concentration and exhalation rate measurements in Indian coal, fly ash and cement samples using CR-39 plastic track detectors. *Nuclear Science Journal*, Vol 38, No 4, 2001, p. 289–293.
- Chen, C.-J.; Weng, P.-S.; Chu, T.C. Radon exhalation rate from various building materials. *Health Physics*, Vol 64, No 6, 1993, p. 613–619.
- Clavensjo, B.; Åkerblom, G.; Morkūnas, G. Radonas patalpose. Jo kiekio mažinimo būdai, Litimo, Vilnius, 1999, 126 p.

Clouvas, A.; Xanthos, S.; Antonopoulos-Domis, M. A combination study of indoor radon and *in situ* gamma spectrometry measurements in Greek dwellings. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 103, No 4, 2003, p. 363–366.

Clouvas, A.; Xanthos, S.; Antonopoulos-Domis, M. Extended survey of indoor and outdoor terrestrial gamma radiation in Greek urban areas by *in situ* gamma spectrometry with portable Ge detector. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 94, No 3, 2001, p. 233–245.

Clouvas, S.; Xanthos, M.; Antonopoulos-Domis, M. Derivation of indoor dose rate from high resolution *in situ* gamma ray spectra. *Health Physics*, Vol 79, No 3, 2000, p. 274–271.

Commission Recommendation 90/143/Euratom of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to radon. Official Journal of European Communities, Series L, No 80, 1990, p. 26–28.

Council Directive 89/106/EEC of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States related to construction products. Official Journal of European Communities, Series L, No 40, 1989, p. 12–26.

Council Directive 96/29 Euratom of 13 May 1996 laying down the basic safety standards of the health of workers and the general public against the danger arising from the ionising radiation. Official Journal of European Communities, Series L, No 159, 1996, p. 1–114.

Darbo instrukcija „Gama spektrometrija. Standarto IEC 1452:1995 papildymas“. PES-G:2004. Radiacinės saugos centras, Programų ir ekspertizės skyrius, 2004, 85 p.

De Beer, G.P.; Beyleveld, J.F. Survey results on categories, quantities and radiological hazards of radioactive waste from acid and uranium plants, chamber of Mines of South Africa. Johannesburg, 1993, 60 p.

De Beer, G. P.; Strydom, R. Assessment of the radiation dose from floor slabs of concrete mixtures containing an aggregate from the waste rock pile at western areas Ltd. Report PR-VLG-10/98/12, South African Atomic Energy Corporation, Pretoria, 1998, 45 p.

Dodona, A. Estimation of the natural radioactivity of the Albanian clays. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, Vol 3, No 1, 2000, p. 7–12.

Dwivedi, K. K.; Mishra, R.; Tripathy, S. P.; Kulshreshtha, A.; Sinha, D.; Srivastava, A.; Deka, P.; Bhattacharjee, B.; Ramachandran, T.V.; Nambi, K. S. V. Simultaneous determination of radon, thoron and their progeny in dwellings. *Radiation measurements*, Vol 33, No 1, 2001, p. 7–11.

El-Arabi, A. M. Prediction of the expected inhalation doses by measuring the natural radioactivity of building materials used in upper Egypt. *Nuclear Science Journal*, Vol 38, No 2, 2001, p. 141–146.

El-Bahi, S. M. Assessment of radioactivity and radon exhalation rate in Egyptian concrete. *Health Physics*, Vol 86, No 5, 2004, p. 517–522.

El-Hussein, A. A study on natural radiation exposure in different realistic living rooms. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 79, No 3, 2005, p. 355–367.

Ettenhuber, E.; Lehmann, R. The collective dose equivalent due to the naturally occurring radionuclides in building materials in the German Democratic Republic. Part 1: External Exposure. *Health Physics*, Vol 50, No 1, 1986, p. 49–56.

European Commission. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. *Radiation Protection 112*. Luxembourg, 1999, 18 p.

Farai, I. P.; Ademola, J. A. Population dose due to building materials in Ibadan, Nigeria. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 95, No 1, 2001, p. 69–73.

Feger, I.; Adrasi, A.; Koblinger, L.; Zombori, P.; Szabo, P. P. Effects of activity inhomogeneities in walls on the external gamma doses in rooms. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 7, No 1–4, 1984, p. 239–241.

Gasiūnas, K.; Mastauskas, A.; Morkūnas, G. Radonas grunto ore ir patalpose Lietuvoje. *Statyba*, IV t., Nr 4, 1998, p. 316–321.

Gesell, T. F. Occupational radiation exposure due to ^{222}Rn in natural gas and natural gas products. *Health Physics*, Vol 29, No 5, 1975, p. 681–687.

Gunby, J. A.; Darby, S. C.; Miles, J. C. H.; Green, B. M. R.; Cox, D. R. Factors affecting indoor radon concentrations in the United Kingdom. *Health Physics*, Vol 64, No 1, 1993, p. 2–12.

Gyvenamieji namai ir būstai. Statistikos departamentas. Vilnius, 2003, 135 p.

Haridasan, P. P.; Maniyan, C. G.; Pillai, P. M. B.; Khan, A. H. Dissolution characteristics of ^{226}Ra from phosphogypsum. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 62, No 3, 2002, p. 287–294.

Hausberg, J. Global red mud reduction potential through optimized technologies and ore selection. *Mineral Resources Engineering*, Vol 9, No 4, 2000, p. 407–420.

Higienos norma HN 85-2003 “Gamtinė apšvita. Radiacinės saugos normos“. Žin.; 2004, Nr. 30–997.

Hull C. D.; Burnett, W. C. Radiochemistry of Florida phosphogypsum. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 32, No 3, 1969, p. 213–238.

Hwang, J.-Y.; Chang, J. B. H.; Chang, W. P. Spread of ^{60}Co contaminated steel and its legal consequences in Taiwan. *Health Physics*, Vol 80, No 6, 2001, p. 655–660.

Idrish Miah, M. Environmental gamma radiation measurements in Bangladeshi houses. *Radiation measurements*, Vol 38, No 3, 2004, p. 277–280.

IAEA. International Atomic Energy Agency. Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive material (NORM) and technological options for mitigation. *IAEA Technical Reports Series No 419*, Vienna, 2003, 208 p.

IAEA. International Atomic Energy Agency. Nature and magnitude of the problem of spent radiation sources details. *IAEA TECDOC Series No 620*, Vienna, 1991, 81 p.

ICRP. International Commission on Radiological Protection. Human respiratory tract model for radiological protection. *ICRP publication 66*, Vol 24, No 1–3, 1994, 482 p.

- ICRP. International Commission on Radiological Protection. Lung cancer risk from indoor exposure to radon daughters. *ICRP publication 50*, Vol 17, No 1, 1987, 60 p.
- ICRP. International Commission on Radiological Protection. Protection against radon-222 at home and at work. *ICRP publication 65*, Vol 23, No 2, 1993, 45 p.
- ICRP. International Commission on Radiological Protection. Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure. The application of the Commission's system of radiological protection to controllable radiation exposure due to natural sources and long-lived radioactive residues. *ICRP publication 82*, Vol 29, No 1–2, 1999, 109 p.
- International standard IEC 1452:1995. Nuclear instrumentation – measurements of gamma-ray emission of radionuclides – Calibration and use of germanium spectrometers, 1995 187 p.
- Jang, M.; Kang, C.-S.; Moon, J. H. Estimation of ^{222}Rn release from the phosphogypsum board used in housing panels. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 80, No 2, 2005, p. 153–160.
- Jang, M.; Ko, H.-S.; Moon, J.-H.; Kang, C.-S. Evaluation of the steady-state concentration of indoor airborne radon due to radium included in phosphogypsum board. *Transactions of the American Nuclear Society*, Vol 86, 2002, p. 384–390.
- Jang, M.; Moon, J.-H.; Kang, C.-S. A study on the evaluation of the indoor radon concentration. *Transactions of the American Nuclear Society*, Vol 88, 2003, p. 120–121.
- Julius H.W.; Van Dongen, R. Radiation doses to the population in the Netherlands, due to external natural sources. *The Science of the Total Environment*, Vol 45, 1985, p. 449–458.
- Kahn, B.; Eichholz, G. G.; Clarke, F. J. Search for building materials as sources of elevated radiation dose. *Health Physics*, Vol 45, No 2, 1983, p. 349–362.
- Kant, K.; Chauhan, R. P.; Sharma, G. S.; Chakarvarti, S. K. Radon induced radiological impact of coal, fly ash and cement samples. Indian. *Journal of Pure and Applied Physics*, Vol 39, No 10, 2001, p. 679–82.
- Keller, G.; Hoffmann, B.; Feigespan, T. Radon permeability and radon exhalation of building materials. *Science of the Total Environment*, Vol 272, No 1–3, 2001, p. 85–89.
- Khan, K.; Aslam, M.; Orfi, S. D.; Khan, H. M. Radiological significance of building bricks in Pakistan. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 95, No 3, 2001, p. 263–266.
- Khan, K.; Khan, H. M. Natural gamma-emitting radionuclides in Pakistani Portland cement. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol 54, No 5, 2001, p. 861–865.
- Koblinger, L. Calculation of exposure rates from gamma sources in walls of dwelling rooms. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 34, No 5, 1978, p. 459–463.
- Koblinger, L. Mathematical models of external gamma radiation and congruence of measurements. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 7, No 1–4, 1984, p. 227–234.
- Koblinger, L. REBEL-2: An adjoint Monte Carlo Code for the calculation of radiation in dwelling room. KFKI-76, Central Research Institute for Physics, Budapest, 1976, 65 p.
- Kohshi, C.; Takao, I.; Hideo, S. Terrestrial gamma radiation in Koshi refecture, Japan. *Journal of Health Sciences*, Vol 47, No 4, 2001, p. 326–372.

- Kovler, K.; Perevalov, A.; Steiner, V.; Metzger, L. A. Radon exhalation of cementitious materials made with coal fly ash: Part 1 – scientific background and testing of the cement and fly ash emanation. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 82, No 3, 2005, p. 321–334.
- Kovler, K.; Perevalov, A.; Steiner, V.; Rabkin, E. Determination of the radon diffusion length in building materials using electrets and activated carbon. *Health Physics*, Vol 86, No 5, 2004, p. 505–516.
- Kullab, M. Assessment of radon-222 concentrations in buildings, building materials, water and soil in Jordan. *Applied radiation and isotopes*, Vol 62, No 5, 2005, p. 765–773.
- Kumar, A.; Kumar, M.; Singh, B.; Singh, S. Natural activities of ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K in some Indian building materials. *Radiation Measurements*, Vol 36, No 1–6, 2003, p. 465–469.
- Kumar, R.; Mahur, A.K.; Sengupta, D.; Prasad, R. Radon activity and exhalation rates measurements in fly ash from a thermal power plant. *Radiation measurements*, Vol 40, No 2–6, 2005, p. 638–641.
- Lalkhan, M. J. Nuclear Energy Corporation of South Africa. Pretoria, personal communication, 2001.
- Lau, M. F.; Balendran, R. V.; Yu, K. N. Metakaolin as a radon retardant from concrete. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 103, No 3, 2003, p. 273–276.
- Lavi, N.; Groppi, F.; Alfassi, Z. B. On the measurement of ^{40}K in natural and synthetic materials by the method of high-resolution gamma-ray spectrometry. *Radiation Measurements*, Vol 38, No 2, 2004, p. 139–143.
- Lebedytė, M.; Butkus, D.; Morkūnas, G. Estimation of external equivalent gamma dose rate caused by gamma radionuclides in soil. *Environmental and Chemical Physics*, Vol. 21, No 3–4, 1999, p. 78–82.
- Lee, E. M.; Menezes, G.; Finch, E. C. Natural radioactivity in building materials in the Republic of Ireland. *Health Physics*, Vol 86, No 4, 2004, p. 378–383.
- Lee, S.-C.; Kim, C.-K.; Lee, D.-M.; Kang, H.-D. Natural radionuclides contents and radon exhalation rates in building materials used in South Korea. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 94, No 3, 2001, p. 269–274.
- Lei Min, Wang Chengqiong, Pen Yuangui. The radioactivity level of building materials mixed with coal cinder and pollution countermeasures. *Journal of the East China College of Geology*, Vol 24, No 2, 2001, p. 123–126.
- Leung, J. K. C.; Tso, M.-Y. W.; Ho, C. W. Behavior of ^{222}Rn and its progeny in high rise buildings. *Health Physics*, Vol 75, No 3, 1998, p. 303–312.
- Leung, J. K. C.; Tso, M.-Y. W.; Hung, L. C. Radon mitigation by depressurization of concrete walls and slabs. *Health Physics*, Vol 77, No 4, 1999, p. 420–426.
- Lukutsova, N. P.; Kozlov, O. Y.; Krupnyi, G. I.; Maslov, M. A.; Rastsvetalov, Y. N.; Yanovich, A. A. Radiation safety of construction materials and industrial wastes. *Atomic Energy*, Vol 90, No 4, 2001, p. 293–302.

- Lund, J. W.; Boyd, T.; Monnie, D. Use of silica waste from the Cerro-Prieto geothermal field as construction material. *Geo-Heat Center Quart. Bull.*; Vol 16, No 2, 1995, p. 15–22.
- LST EN ISO/IEC 17025:2003. Tyrimų, bandymų ir kalibravimo laboratorijų kompetencija. Bendrieji reikalavimai (ISO/IEC 17025:1999). 55 p.
- Maduar, M. F.; Hiromoto, G. Evaluation of indoor gamma radiation dose in dwellings. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 111, No 2, 2004, p. 221–228.
- Magill, J. Nuclides.net. An integrated environment for computation on radionuclides and their radiation. European Commission Joint Research Centre, Institute for Transuranium Elements, 2003, 271 p.
- Malanca, A.; Pessina, V.; Dallara, G. Radionuclide content of building materials and gamma ray dose rates in dwellings of Rio Grande Do Norte, Brazil. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 48, No 2, 1993, p. 199–203.
- Man, C.-K.; Lau, S.-Y.; Au, S.-C.; Ng, W.-K. Radionuclide contents in building materials used in Hong Kong. *Health Physics*, Vol 57, No 3, 1989, p. 397–402.
- Markkanen, M. Challenges in harmonising controls on the radioactivity of building materials within the European Union. *The Science of the Total Environment*, Vol 272, No 1–3, 2001, p. 3–7.
- Markkanen, M. Radiation dose assessments for materials with elevated natural radioactivity, STUK-B-STO 32, 1995. Helsinki, 40 p.
- Masahiro, Y.; Kobayashi, S. Characterization of Japanese wooden houses with enhanced radon and thoron concentrations. *Health Physics*, Vol 66, No 3, 1997, p. 274–282.
- Mastauskas, A.; Morkūnas, G. The problem of indoor radon in Lithuania. *Health Physics*, Supplement, Vol 70, No 6, 1996, p. S81.
- Matiullah, N. A.; Hussein, A. J. A. Natural radioactivity in Jordanian soil and building materials and the associated radiation hazards. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 39, No 1, 1998, p. 9–22.
- Minkin, L. Thermal diffusion of radon in porous media. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 106, No 3, 2003, p. 267–272.
- Mirza, N. M.; Ali, B.; Mirza, S. M.; Tufail, M.; Ahmad, N. A shape and mesh adaptative computational methodology for gamma-ray dose from volumetric sources. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 38, No 4, 1991, p. 307–314.
- Misdaq, M. A. Use of three new SSNTD methods for evaluating thorium contents in different building materials and measuring thoron and its progeny concentrations inside dwellings. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol 57, No 2, 2002, p. 285–294.
- Morkūnas, G. Radono sąlygotos efektinės dozės individualiuosiuose namuose įvertinimas. Daktaro disertacija, Vilnius, 2000, 89 p.
- Morkūnas, G.; Mastauskas, A. Indoor radon concentrations in Lithuania. In: *Proceedings of European Conference “Protection against radon at home and at work”, 2–6 June 1997, Prague*, p. 148–151.

- Morkūnas, G.; Pilkytė, L.; Ereminas, D. Evaluation of exposure to cosmic radiation of light crews of Lithuanian airlines. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, Vol 16, No 2, 2003, p. 161-167.
- Msaki, P.; Banzi, F. P. Radioactivity in products derived from gypsum in Tanzania. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 91, No 4, 2000, p. 409–412.
- Mudar, M. F.; Hiromoto, G. Evaluation of indoor gamma radiation dose in dwellings. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 111, No 2, 2004, p. 221–228.
- Mustonen, R. Methods for evaluation of radiation from building materials. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 7, No 1–4, 1985, p. 235–238.
- Nanping, W.; Yuhe, W.; Ming, Z. Radioactivity estimation of natural stone as building materials. *Geoscience*, Vol 12, No 2, 1998, p. 277–282.
- National Council on Radiation Protection and Measurements. Control of radon in houses. *NCRP Report No 103*, 1989, 90 p.
- National group for studying the radiological implications in the use of zircon sand. Radiation protection aspects of the use of zircon sand. *Science of the Total Environment*, Vol 45, 1985, p. 135–142.
- O'Brien, R. S. Gamma doses from phospho-gypsum plaster board. *Health Physics*, Vol 72, No 1, 1997, p. 92–96.
- Oner, F.; Okumusoglu, N. T. Radiation dose calculation in the human body for building materials and soil exposure pathways. *Radioprotection*, Vol 36, No 3, 2001, p. 329–332.
- Papastefanou, C.; Stoulos, S.; Manolopoulou, M. Natural radiation exposure and radon exhalation from building materials. *Health Physics, Supplement to Vol 86*, No 6, 2004, p. 216.
- Paredes, C. H.; Kessler, W. V.; Landolt, R. R.; Ziemer, P. L.; Paustenbach, D. J. Radionuclide content of and ^{222}Rn emanation from building materials made from phosphate industry waste products. *Health Physics*, Vol 53, No 1, 1987, p. 23–30.
- Penfold, J. S. S.; Degrange, J. P.; Mobbs, S. F.; Schneider, T. Establishment of reference levels for regulatory control of workplaces where minerals are processed which contain enhanced levels of naturally occurring radionuclides. *Radiation Protection No. 107*, Commission of the European Communities, Luxembourg, 1999, 234 p.
- Petropoulos, N. P.; Anagnostakis, M. J.; Simopoulos, S. E. Photon attenuation, natural radioactivity content and radon exhalation rate of building materials. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 61, No 3, 2002, p. 257–269.
- Pinnock, W. R. Measurements of radioactivity in Jamaican building materials and gamma dose equivalents in a prototype red mud house. *Health Physics*, Vol 61, No 5, 1991, p. 647–652.
- Pinnock, W. R. Radon levels and related doses in a prototype Jamaican house constructed with bauxite waste blocks. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 81, No 4, 1999, p. 291–299.
- Popovic, D.; Djuric, G.; Todorovic, D. Radionuclides in building materials and radon indoor concentrations. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 63, No 3, 1996, p. 223–225.

Reddy, M. Sreenath, Reddy, B. Sreenivasa, Reddy, Ch. Gopal, Reddy, P. Yadagiri, Reddy, K. Rama. Study of indoor radon and its progeny concentration levels in the surrounding areas of Hyderabad, Andhra Pradesh, India. *Radiation measurements*, Vol 36, No 1–6, 2003, p. 507–510.

Richard N. Biagioni; Ralph W. Sheets. ^{222}Rn emanation from uranium-glazed ceramics. *Health Physics*, Vol 80, No 2, 2001, p. 148–150.

Roy, S.; Alam, M. S.; Begum, M.; Alam, B. Radioactivity in building materials used in and around Dhaka city. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 114, No 4, 2005, p. 527–532.

Sam, A. K.; Abbas, N. Assessment of radioactivity and the associated hazards in local and imported cement types used in Sudan. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 93, No 3, 2001, p. 275–277.

Schaller, G.; Bayer, A. Clearance of material with negligible levels of radioactivity based on the amended German Radiation Protection Ordinance. *Kerntechnik*, Vol 67, No 1, 2002, p. 18–23.

Schmidt, G.; Kuppers, C.; Robinson, P. Handling of radium and uranium contaminated waste piles and other wastes from phosphate ore processing. Nuclear Science and Technology, Report EUR 15448 EN, European Commission, Luxembourg, ISBN 92-827-4076-5, 1995, 121 p.

Scholten, L. C. Approaches of regulating management of large volumes of waste containing natural radionuclides in enhanced concentrations. Nuclear Science and Technology, Report EUR 16956 EN, European Commission, Luxembourg, ISBN 92-827-8288-3, 1996, 85 p.

Sciocchetti, G.; Clemente, G. F.; Ingrao, G.; Scacco F. Results of a survey on radioactivity of building materials in Italy. *Health Physics*, Vol 45, No 2, 1983, p. 385–388.

Sextro, R. G. Radon and the natural environment. In: Nagda NL (eds.). Radon: Prevalence. Measurements, Health Risks and Control. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials. 1994, p. 9–32.

Shaikh, A. N.; Ramachandran, T. V.; Vinod Kumar, A. Monitoring and modelling of indoor radon concentrations in a multi-storey building at Mumbai, India. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 67, No 1, 2003, p. 15–26.

Shi Weiya, Lu Zuhui, Xu Aijun, Zhao Weijuan, Li Youming. Radioactive research of building material. *Nuclear Techniques*. Vol 24, No 2, 2001, p. 122–127.

Shirav-Schwartz, M. Some remarks on high natural background radiation terrains, geology and public health in Israel and adjacent countries. IRPA 11 congress papers, 2004 [žiūrėta 2006 m. sausio 17 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.irpa11.com/new/pdfs/6b13.pdf>>

Shukla, V. K.; Sadasivan, S.; Sundaram, V. K.; Nambi, K. S. V. Assessment of gamma radiation exposure inside a newly constructed building and a proposed regulatory guideline for exposure control from natural radioactivity in future buildings. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 59, No 2, 1995, p. 127–133.

Singh, S.; Rani, A.; Mahajan, R. M. ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K analysis in soil samples from some areas of Punjab and Himachal Pradesh, India using gamma ray spectrometry. *Radiation Measurements*, Vol 39, No 4, 2005, p. 431–439.

Singh, S.; Singh, J.; Singh, L.. The study of some common plaster coating materials and plastic foils as a barrier to radon. *Radiation measurements*, Vol 40, No 2–6, 2005, p. 673–677.

Sivakumar, R.; Selvasekarapandian, S.; Mugunthamanikandan, N.; Raghunath, V. M. Indoor gamma dose measurements in Gudalore (India) using TLD. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol 56, No 6, 2002, p. 883–892.

Steger, F.; Grun, K. Radioactivity in building materials ONORM S 5200: a standard in Austria to limit natural radioactivity in building materials. *Radon in living environment*, 1999, p. 219–224.

Steger, F.; Kunsch, B.; Buchner, I. ONORM S 5200: Radioactivity in building materials (a standard in Austria to limit natural radioactivity in building materials). *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 45. No 1–4, 1992, p. 721–722.

Stoulos, S.; Manolopoulou, M.; Papastefanou, C. Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation from building materials in Greece. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 69, No 3, 2003, p. 225–240.

Stranden, E. Radioactivity in building materials and the gamma radiation in dwellings. *Physics in Medicine and Biology*. Vol 24, No 5, 1979, p. 921–930

Sun, H. Monte Carlo simulation of radon emanation from dry building materials. *Health Physics*, Vol 68, No 4, 1995, p. 553–560.

Suzuki, A.; Iida, T.; Moriizumi, J.; Sakuma, Y. The effects of different types of concrete on population doses. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 90. No 4, 2000, p. 437–443.

Takriti, S.; Shweikani, R.; Ali, A. F.; Hushari, M.; Kheitou, M. Diffusion of radon through varying depths of cement. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol 55, No 1, 2001, p. 115–134.

Takriti, S.; Shweikani, R.; Ali, A. F.; Rajab, G. The effect of sand/cement ratio on radon exhalation from cement specimens containing ^{226}Ra . *Radiation measurements*, Vol 38, No 1, 2004, p. 31–36.

Tso, M.-Y. W.; Ng, C.-Y.; Leung, J. K. C. Radon release from building materials in Hong Kong. *Health Physics*, Vol 67, No 4, 1994, p. 378–384.

Tung, T. C. W, Niu, J. L.; Burnett, J.; Lau, J. O. W. Methodology for determination of radon-222 production rate of residential building and experimental verification. *Radiation measurements*, Vol 40, No 1, 2005, p. 110–117.

Tzortzis, M.; Tsertos, H.; Christofides, S.; Christodoulides, G. Gamma radiation measurements and dose rates in commercially-used natural tiling rocks (granites). *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 70, No 3, 2003, p. 223–236.

United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2001, 195 p. [žiūrėta 2006 m. sausio 17 d.]. Prieiga per internetą:
<<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2001/mcs2001.pdf>>

UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 1996 report to the General Assembly. United Nations, New York, 1996, 86 p.

UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 1993 report to the General Assembly. United Nations, New York, 1993, 922 p.

UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2000 report to the General Assembly, Vol 1. United Nations, New York, 2000. 654 p.

Urosevi, V.; Nikezi, D. Radon transport through concrete and determination of its diffusion coefficient. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 104, No 1, 2003, p. 65–70.

US Environmental Protection Agency. Characterization and control of radionuclide emissions from elemental phosphorus production. Rep. EPA-450/3-88-015. USEPA, Washington, 1989, 89 p.

US Environmental Protection Agency. Report to Congress on special wastes from mineral processing / Rep. EPA/530-SW-90-070C, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, 1990, 111 p.

Valiukėnas, V.; Makariūnienė, E.; Morkūnas, G. Jonizuojančiosios spinduliuotės ir radiacinės saugos terminų žodynas. Vilnius. Litimo. 1999, 152 p.

van Dijk, W.; de Jong, P. Determining the ^{222}Rn exhalation rate of building materials using liquid scintillation counting. *Health Physics*, Vol 61, No 4, 1991, p. 501–510.

Vandenhove, H.; et al. Investigation of a possible basis for a common approach with regard to the restoration of areas affected by lasting radiation exposure as a result of past or old practice or work activit-care / Final Report to the European Commission, Contract 96-ET-006, *Radiation Protection 115*, 2000, 242 p.

Vaupotic, J.; Sikovec, M.; Kobal, I. Systematic indoor radon and gamma-ray measurements in Slovenian schools. *Health Physics*, Vol 78, No 5, 2000, p. 559–562.

Venturini, L.; Nisti, M. B. Natural radioactivity of some Brazilian building materials. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 71, No 3, 1997, p. 227–229.

Vermeersch, F. Alara pre-job studies using the VISIPLAN-3D alara planning tool. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 115, No 1–4, 2005, p. 294–297.

Wilson, J. W. Overview of radiation environments and human exposures. *Health Physics*, Vol 79, No 5, 2000, p. 470–494.

Xinwei, L. Natural radioactivity in some building materials of Xi'an, China. *Radiation measurements*, Vol 40, No 1, 2005, p. 94–97.

Xinwei, L. Radioactive analysis of cement and its products collected from Shaanxi, China. *Health Physics*, Vol 88, No 1, 2005, p. 84–86.

Yahong, M.; Libin, L.; Yigang, L. Measuring method of undamaged samples for the radiation levels of decorative building materials. *Health Physics*, Vol 87, No 1, 2004, p. 75–78.

Yahong, M.; Yigang, L.; Guang, Z.; Xiaolei, H. The studies on radiological limits of color-glazed tiles used in home decoration. *Health Physics*, Vol 82, No 4, 2002, p. 510–512.

Yu K. N.; Young E. C. M.; Stokes M. J.; Guan Z. J.; Cho K. W. A survey of radon and thoron progeny for dwellings in Hong Kong. *Health Physics*, Vol 73. No 2, 1997, p. 373–377.

Yu, K. N.; Cheung, T.; Koo, S. Y. Effects of using light-weight concrete on indoor radon concentration in high-rise buildings. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 86, No 2, 1999, p. 147–152.

Zaidi, J. H.; Arif, M.; Ahmad, S.; Fatima, I.; Qureshi, I. H. Determination of natural radioactivity in building materials used in the Rawalpindi/Islamabad area by gamma-ray spectrometry and instrumental neutron activation analysis. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol 51, No 5, 1999, p. 559–564.

Zalewski, M.; Tomczak, M.; Kapala, J. Radioactivity of building materials available in northeastern Poland. *Polish journal of environmental studies*, Vol 10, No 3. 2001, p. 183–188.

Zikovsky L.; Kennedy G. Radioactivity of building materials available in Canada. *Health Physics*, Vol 63, No 4, 1992, p. 449–452.

Autorės paskelbti darbai disertacijos tema

MII (ISI Master Journal List) žurnaluose

- 1A. Pilkytė, L.; Butkus, D.; Morkūnas, G. Assessment of external dose indoors in Lithuania. *Radiation Protection Dosimetry*, Advance access published December 6, 2005, doi: 10.1093/rpd/nci370.
- 2A. Gricienė, B.; Ladygienė, R.; Morkūnas, G.; Pilkytė, L. Current status of internal dosimetry in Lithuania. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 105, No 1–4, 2003, p. 491–494.

ISI proceedings

- 3A Butkus, D.; Pilkytė, L.; Morkūnas, G. Modeling of doses indoors due to construction materials. In: *Proceedings of 6th International Conference “Environmental engineering”*. Vilnius: Technika, Vol 1, 2005, p. 58–62. ISBN 9986-05-850-3.

Tarptautinėse duomenų bazėse referuotuose žurnaluose

- 4A Pilkytė, L.; Butkus, D. Influence of gamma radiation of indoor radon decay product on absorbed dose rate. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, Vol 13, No 2, 2005, p. 65–72.
- 5A Butkus, D.; Morkūnas, G.; Pilkytė, L. Ionizing radiation in buildings: situation and dealing with problems. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, Vol 13, No 2, 2005, p. 103–107.

Recenzuojamuose mokslo žurnaluose anglų ir lietuvių kalbomis

- 6A Pilkytė, L.; Morkūnas, G.; Åkerblom, G. Indoor radon in the karst region of Lithuania. *Radioactivity in the environment*, a companion series to the *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol 7, 2005, p. 807–812.
- 7A Gricienė, B.; Ladygienė, R.; Morkūnas, G.; Pilkytė, L.; Žiliukas, J. Radiacinės saugos tiriamieji darbai. *Sveikatos mokslai*, Nr. 2, 2002, p. 9–12
- 8A Ladygienė, R.; Pilkytė, L.; Gricienė, B.; Morkūnas, G. Darbuotojų vidinės apšvitos pagal nustatytus atskirų radionuklidų aktyvumus biologiniuose ėminiuose įvertinimo sistemos kūrimas. *Sveikatos mokslai*, No 2, 2002, p. 13–18.
- 9A Morkūnas, G.; Åkerblom, G.; Pilkytė, L. Results of the Swedish and Lithuanian co-operation in protection from natural exposure, *Sveikatos mokslai*, Nr. 2, 2002, p. 80–84.
- 10A Abromaitytė, R.; Morkūnas, G.; Pilkytė, L. Radono rizikos tyrimai Panevėžio miesto plėtros zonoje. *Sveikatos mokslai*, Vol 13, No 3, 2003, p. 32–35.
- 11A Ladygienė, R.; Morkūnas, G.; Pilkytė, L. Regulatory and scientific aspects of environmental studies. *Sveikatos mokslai*, Vol 14, No 2, 2004, p. 2–5.
- 12A Morkūnas, G.; Pilkytė, L. Lietuvos gyventojų gamtinė apšvita. *Sveikatos mokslai*, Vol 14, No 2, 2004, p. 48–51.

Konferencijų leidiniuose

- 13A Morkūnas, G.; Pilkytė, L.; Åkerblom, G. Residence related exposure in Lithuania – from national survey to remedial measures. 11th International congress of the International Radiation Protection Association. May 23–28, 2004, Madrid.

- 14A Morkūnas, G.; Pilkytė, L.; Abromaitytė, R. Ionizing radiation indoors. Proceedings of the 2nd WHO International Housing and Health Symposium, Vilnius, September 29 – October 1, 2004, p. 565.
- 15A Pilkytė, L.; Butkus, D. Buto konstrukcinių elementų įtakos sugertosios dozės galiai ore tyrimai. VGTU 9-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 2006 (spaudoje).
- 16A Pilkytė, L.; Butkus, D. Gamtinės kilmės radionuklidų savitieji aktyvumai statybinėse medžiagose. VGTU 8-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 2005, p. 385–391.
- 17A Pilkytė, L.; Butkus, D. Radono skilimo produktų gama spinduliuotės įtakos išorinės apšvitos dozei patalpose įvertinimas. VGTU 7-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 2004, p. 229–235.
- 18A Pilkytė, L.; Butkus, D. Statybinės medžiagos kaip apšvitos šaltinis. VGTU 6-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 2003, p. 198–204.

Baigusi darbą noriu padėkoti savo vadovui prof. Donatui Butkui už vertingus patarimus ir reiklumą, Vilniaus Gedimino technikos universiteto Aplinkos apsaugos katedros vedėjui prof. Pranui Baltrėnui ir katedros darbuotojams, su kuriais buvo gera bendrauti visą doktorantūros laiką ir, tikiuosi, bus naudinga bendradarbiauti ateityje.

Visus tyrimus atlikau Radiacinės saugos centre su pačia moderniausia įranga, todėl esu labai dėkinga už puikias galimybes dirbti. Direktoriui Albinui Mastauskui noriu padėkoti už nuolatinį skatinimą dirbti ir siekti. Tokius sudėtingus matavimus, kaip radono tūriniai aktyvumai gyventojų namuose, atlikti vienai neįmanoma, juos atlikau su savo bendradarbiais, kurie su manimi dalijosi visais sunkumais ir džiaugsmais, esu jiems labai dėkinga. Ypatingai noriu padėkoti dr. Gendručiui Morkūnui už jo paskatinimą imtis šio darbo, už jo įdomias idėjas ir diskusijas.

Dėkoju Gustavui Åkerblomui ir dr. Raimo Mustonenui, kurie maloniai dalijosi su manimi savo žiniomis ir patirtimi.

Esu dėkinga savo tėvams ir broliams už palaikymą ir paramą.

Neįmanoma išvardyti visų gerų žmonių, kurie vienaip ar kitaip rėmė, palaikė ir drąsino mane darant šį darbą. Dėkoju jiems visiems.