

Vilniaus pedagoginis universitetas

Fizikos ir technologijos fakultetas

Remigijus Kievinas

**Radono tūrinio aktyvumo patalpose kaitos tyrimai ir radono sąlygotos dozės
gyvenamosiose patalpose įvertinimas**

Magistrinis darbas

Darbo vadovas:

Dr. G. Morkūnas

Vilnius, 2009

Turinys

Įvadas	3
Darbo uždaviniai	4
Praktinė nauda ir naujumas	4
1. Teorija ir literatūros apžvalga	5
1.1 Radioaktyvumas	5
1.2 Radonas	6
1.3 Radono poveikis žmogaus organizmui.....	7
1.4 Radonas patalpose	7
1.5 Radonas grunto ore.....	8
1.6 Radonas statybinėse medžiagose.....	9
1.7 Radonas vandenyje.....	9
2. Tyrimo metodas ir objektai	11
2.1 Tyrimui parinkti objektai ir jų vieta	11
2.2 Radono tūrinio aktyvumo patalpose tyrimo metodika	12
2.3 Radono tūrinio aktyvumo tyrimų atskiru metų laiku metodika.....	15
2.4 Radono tūrinio aktyvumo matavimų grunto ore metodika.....	16
2.5 Statybinių medžiagų tyrimų gama spektrometru metodika.....	17
2.6 Radono geriamajame vandenyje tyrimų metodika	19
2.7 Radono ir jo skilimo produktų sąlygotos apšvitos vertinimo metodika.....	20
3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas	23
3.1 Kompleksiniai radiologiniai tyrimai Vilniaus regione	23
3.2 Radono tūrinio aktyvumo tyrimai patalpų ore 2008-2009 metais.....	26
3.3 Radono tūrinio aktyvumo kaitos tyrimai atskiru metų laiku	27
Išvados	34
Anotacija	35
Summary	36
Literatūros sąrašas	37

Ivadas

Norint išvengti apšvitos nuo pavojingo žmogaus sveikatai radono ir jo skilimo produktų, reikia daugybės tyrimų, kurie nustatytų radono tūrinį aktyvumą mus supančioje aplinkoje, gyvenamosiose patalpose. Radonas patalpose atsiranda iš įvairių šaltinių: grunto, statybinių medžiagų, vandens. Radono tūrinis aktyvumas labai priklauso nuo namo konstrukcijos, vėdinimo ir nuo grunto, ant kurio jis pastatytas.

Nors darbų skaičius, nagrinėjantis šią problemą, yra didelis, vienas iš faktorių, kuris sąlygoja radono tūrinius aktyvumus gyvenamojoje aplinkoje, yra regiono, kuriame radono tūrinis aktyvumas matuojamas, ypatumai – grunto sudėtis, poringumas, namo konstrukcijų tipai ir kiti. Nėra visiškai aišku, kurie iš faktorių lemia radono tūrinio aktyvumo kitimą pastatuose konkrečioje vietoje. Šio darbo tikslas – ištirti, kokią sąryšį radono tūrinis aktyvumas turi grunto ore, geriamajame vandenyje ir radono tūrinis aktyvumas patalpose, tyrimams pasirenkant palyginti nedidelį regioną – šalies pietryčiuose esančios Vilniaus apskrities Vilniaus, Šalčininkų ir Širvintų rajonus. Palyginimui naudotas radono tūrinis aktyvumas, tirtas pastatuose kituose šalies regionuose. Taip pat įvertinta radono tūrinio aktyvumo kaita skirtingais metų sezonais gyvenamajame pastate, kiek aktyvumui įtakos daro grunto pralaidumas ir namo sandarinimo ypatybės.

Darbo tikslas

Nustatyti sąryšį tarp radono grunte gyvenamojo pastato aplinkoje ir radono tūrinio aktyvumo pastato ore, palyginti radono tūrinį aktyvumą patalpose šalies pietryčių regione su aktyvumais kituose šalies regionuose ir įvertinti, kaip radono aktyvumą patalpose įtakoja sezoniškumas. Apskaičiuoti apšvitos dozes, kurias gauna gyventojai dėl radono patalpų ore, geriamajame vandenyje Lietuvos pietryčių regione.

Darbo uždaviniai

- Ištirti radono tūrinį aktyvumą grunte ore, esančiame prie pasirinktų gyvenamųjų pastatų Vilniaus regione, išmatuoti radono tūrinį aktyvumą vandenyje, kuris naudojamas tose patalpose gyvenančių žmonių bei ištirti radono tūrinį aktyvumą patalpose;
- Nustatyti ryšį tarp radono tūrinio aktyvumo grunte ir patalpose;
- Palyginti radono tūrinius aktyvumus Viliaus apskrityje su kitais Lietuvos rajonais;
- Apskaičiuoti ir palyginti žmogaus gaunamą apšvitą nuo radono patalpose ir geriamajame vandenyje Vilniaus apskrities Vilniaus, Šalčininkų ir Širvintų rajonuose;
- Nustatyti sezoniškumo faktorių įtaką radono aktyvumui gyvenamosiose patalpose.

Praktinė nauda ir naujumas

Nustatyti radono aktyvumai Vilniaus apskrities Vilniaus, Šalčininkų ir Širvintų rajonų gyvenamųjų namų aplinkoje (grunte, geriamajame vandenyje ir patalpų ore) ir įvertinta, kokią vidinę apšvitą nuo radono gauna šių namų gyventojai. Apšvita palyginta su gyventojų kituose šalies rajonuose gauta apšvita dėl radono patalpų ore bei gama spinduliuotės patalpose. Įvertinta, kaip kinta radono tūrinis aktyvumas patalpų ore keičiantis metų laikams, t. y., kokią įtaką radono aktyvumui turi patalpos vėdinimas skirtingu metų laiku, temperatūra patalpose ir lauke.

Darbo naujumas yra tai, kad pirmą kartą mūsų šalies gyvenamųjų namų aplinkoje įvertinta radono tūrinio aktyvumo kaita įvairiu metų laiku, atlikus kompleksinius tyrimus, nustatyti radono aktyvumai Vilniaus apskrities Vilniaus, Šalčininkų ir Širvintų rajonų gyvenamųjų patalpų aplinkoje (grunte, geriamajame vandenyje ir patalpų ore) bei įvertinta, kokią vidinę apšvitą nuo radono gauna šių namų gyventojai.

1. Teorija ir literatūros apžvalga

Terminai, apibrėžimai ir santraukos [1]:

Aktyvumas – per laiko tarpą tam tikrame radionuklido kiekyje iš tam tikros energinės būsenos vykstančių savaiminių branduolinių šuolių vidutinio skaičiaus ir to laiko tarpo santykis: $A = dN/dt$, A – aktyvumas; dN – tikėtinas savaiminių branduolinių virsmų (šuolių iš minėtos energinės būsenos) skaičius per laiko tarpą dt . SI sistemoje aktyvumo vienetas yra bekerelis (Bq), t. y. vienas skilimas per sekundę ($1\text{Bq} = 1 \text{ skil./s}$);

Efektinė dozė – sugertoji dozė, padauginta iš atitinkamo spinduliuotės dozės daugiklio, ir audinio jautrio svorinio daugiklio suma. Matavimo vienetas yra (Sv). $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$;

Radionuklidas – atomo branduolys, kuriam būdingas radioaktyvusis skilimas;

Savitasis aktyvumas – bandinio aktyvumo ir pilnutinės jo masės santykis: $a = A/m$. Šio dydžio vienetas – bekerelis kilogramui (Bq/kg); a – savitasis aktyvumas, m – bandinio masė;

Sugertoji dozė – dozimetrijos dydis, apibūdinantis medžiagai spinduliuotės perduotą energijos kiekį. Sugertoji dozė (D) skaičiuojama pagal formulę: $D = dm/dE$, dE – medžiagos tūrio elementui suteikta vidutinė jonizuojančiosios spinduliuotės energija, džauliais (J); dm – to tūrio elemento medžiagos masė, kilogramais (Gy). $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$;

Tūrinis aktyvumas – bandinio aktyvumo ir pilnutinio jo tūrio santykis: $c_A = A/V$. Šio dydžio vienetas – bekerelis kubiniam metrui (Bq/m^3).

1.1 Radioaktyvumas

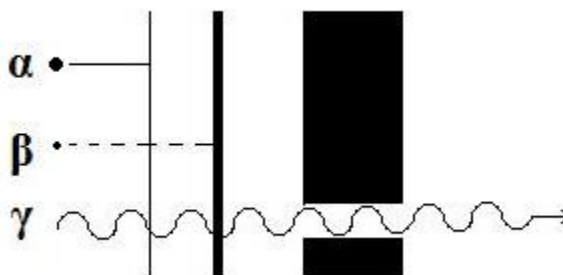
Radioaktyvumas arba radioaktyvusis skilimas – spontaniškas nestabilių kurio nors cheminio elemento izotopų virsmas kito elemento izotopais, išspinduliuojant elementarias daleles arba branduolius. Vykstant radioaktyviajam skilimui, radioaktyvaus elemento atomų skaičius laipsniškai mažėja. Žemės plutoje yra nevienodas kiekis įvairių radioaktyviųjų elementų. Visų radioaktyviųjų elementų bendra ir pagrindinė savybė – nestabilumas. Jų skilimo metu susidaro nauji radioaktyvūs ir stabilūs elementai, ir pasireiškia spinduliavimas. Gamtoje yra trys radioaktyviųjų elementų skilimo grandinės: urano ^{238}U , torio ^{232}Th ir aktinio ^{235}U [2].

Skylant radioaktyviosioms medžiagoms, išspinduliuojama įvairių tipų spinduliuotė [3] (1.1 pav.):

α dalelės yra didelės energijos ${}^4_2\text{He}$ branduoliai. Tai yra teigiamos dalelės, susidedančios iš dviejų protonų ir neutronų. α dalelės siekis ore yra apie 5 cm. Šią spinduliuotę sulaiko ir plonas popieriaus lapas;

β dalelės yra neigiamo krūvio ${}^0_{-1}e$ srautas. Šios dalelės yra skvarbesnės nei α dalelės. Jų siekis ore yra 10 cm. Šias daleles sulaiko plona aliuminio plokštelė;

γ dalelės yra elektromagnetinės bangos. Jų siekis priklauso nuo bangos energijos ir gali siekti iki 100 metrų. Šią spinduliuotę sulaiko storas švino sluoksnis.

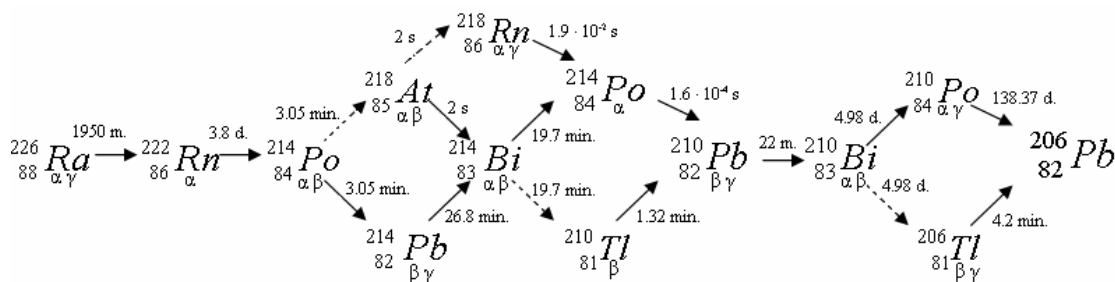


1.1 pav. Alfa ir beta dalelių bei gama spinduliuotės skvarbumo palyginimas

1.2 Radonas

Radonas atsiranda trijose gamtinėse radioaktyvaus skilimo grandinėse. Skilimo metu išspinduliuojamos alfa bei gama dalelės.

${}^{222}\text{Rn}$ turi didžiausią reikšmę žmogaus apšvitai. Jis susidaro skylant ${}^{238}\text{U}$ skilimo grandinei (1.2 pav.). Urano gamtinės kilmės radionuklidų eilė prasideda nuo ${}^{238}\text{U}$, kuris skildamas išspinduliuoja α daleles (pusėjimo trukmė – $4,5 \cdot 10^9$ metų) ir tampa ${}^{234}\text{Th}$. Šiai eilei skylant susidaro radionuklidas ${}^{226}\text{Ra}$. Skildamas ${}^{226}\text{Ra}$ išspinduliuoja alfa bei gama daleles, taip sudarydamas ${}^{222}\text{Rn}$. Radonas yra dujinės būsenos (pusėjimo trukmė – 3,825 dienos). ${}^{222}\text{Rn}$ dujų telkiniai kaupiasi natūraliai, tai reiškia, jog didžiausios koncentracijos dujų yra ten, kur daug ${}^{226}\text{Ra}$ – kasyklose, dirvoje, grunte [4].



1.2 pav. Urano skilimo grandinės dalis (prasideda nuo ${}^{226}\text{Ra}$)

^{220}Rn (toronas) yra vienas iš torio ^{232}Th (pusėjimo trukmė – $8 \cdot 10^4$ metų) grandinės skilimo produktų. Torono pusėjimo trukmė yra 55 sekundės, todėl paprastai jis į patalpas nepatenka, todėl vertinant žmogaus apšvitą jis nėra reikšmingas. Nustatyta, kad vidutinis torono pusiausvyris lygiavertis aktyvumas pasaulyje yra $0,3 \text{ Bq/m}^3$, o vidutinis torono ir radono pusiausvyrųjų lygiaverčių aktyvumų santykis yra 0,03 [5]. Tačiau tam tikromis sąlygomis jis gali kelti pavojų sveikatai [5]. Kadangi torono pusėjimo trukmė labai trumpa, tai tik labai maži kiekiai patenka į patalpas iš grunto, o patekęs į patalpas suskyla jam nepasklidus patalpų ore, tik atskirais atvejais jis gali lemti žmogaus apšvitą, pvz., kūdikiui, kuris šliaužioja žeme. Toronas skyla sudarydamas metalų jonus. Iškart po atsiradimo šie jonai yra laisvi, tačiau greitai „prilimpa“ prie kitų dalelių, esančių ore, arba nusėda ant paviršių.

1.3 Radono poveikis žmogaus organizmui

Vertinant trumpaamžių radono skilimo produktų poveikį žmogaus organizmui svarbu žinoti, kokia radono dujų koncentracija yra patalpose. Žmogaus sveikatai kenksmingas ne tiek pats radonas, bet jo trumpaamžiai skilimo produktai: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po . Radioaktyviosios alfa dalelės pasižymi menka skvarba, bet didele jonizuojančia galia. Jų jonizuojamoji α galia yra bent 20 kartų didesnė negu β ar γ spindulių [3]. Žmogaus odos epitelis nemaža dalimi apsaugo nuo išorinio alfa dalelių poveikio, nes sulaiko neskvarbias alfa daleles, tačiau šios dalelės tampa pavojingomis, kai patenka į organizmą ir gali pažeisti bronchų epitelio ir plaučių audinio ląsteles. Įkvėpus radono trumpaamžių skilimo produktų prisotinto oro, jie nusėda ir suskyla kvėpavimo takuose, taip rizikuojama, kad iš pusiausvyros išvestas organizmas sukurs išsigimusią ląstelę. Tai gali būti vėžinio susirgimo pradžia. Ši medžiaga neturi slenkstinės dozės, tai yra, ir maži radono trumpaamžių skilimo produktų kiekiai gali būti kenksmingi, vadinasi yra tikimybė, kad esant net ir labai mažiems skilimo produktų kiekiams patalpose, jų įkvėpus įvyks alfa skilimas kvėpavimo takuose pažeidžiantis ląstelę [5]. Esant didesniems trumpaamžių radono skilimo produktų kiekiams patalpose, ši tikimybė didėja.

1.4 Radonas patalpose

Kadangi radonas – inertinės dujos, jos lengvai patenka į patalpas pro plyšius iš grunto, ant kurio stovi namas, taip pat išsiskirdamas iš statybinių medžiagų ir iš vandens. Taip susikaupia dideli radono kiekiai ir po jo skilimo susidaro pavojingi trumpaamžiai produktai, kurie labiau kaupiasi, jei patalpos nevedinamos. Esant tokiam pačiam radono kiekiui patalpų ore, radono trumpaamžių skilimo produktų ore daugiau bus tose patalpose, kuriose didesnė aerozolio koncentracija [6]. Radono trumpaamžių skilimo produktų tūrinių aktyvumų vertės patalpose priklauso nuo patalpų

vėdinimo intensyvumo, radono ekshaliacijos iš grunto ir statybinių medžiagų, meteorologinių sąlygų [7].

1.5 Radonas grunto ore

Grunto ore radono tūrinis aktyvumas priklauso nuo to, kiek yra radžio šiame grunte. Radonas grunte yra pernešamas kartu su grunto oru arba vandeniu. Dėl radono skilimo pernešimo atstumas yra ribotas. Apie 90 proc. radono skyla nuėjęs 5 cm vandenyje, apie 2 m drėgname smėlyje ir 5 m ore, jeigu jis pernešamas difuzijos būdu [8]. Esant geram grunto pralaidumui, radonas gali būti perneštas ir dideliais atstumais (20–40 m). Dar didesniais atstumais (iki 100 m) radonas gali būti perneštas grunto vandeniu. Tačiau, perneštas grunto vandens, radonas negali patekti į pastatą tiesiogiai. Į pastatą gali patekti tik su vandeniu [7].

Radono difuzija grunte aprašoma pirmuoju Fiko dėsniumi [5]:

$$j = -D \frac{dC}{dz} \quad (1.1)$$

čia: j – radono srauto tankis, $J/m^2 \cdot s$;

D – jo difuzijos koeficientas m^2/s ;

C – radono dujų koncentracija, s^{-1}/m^3 .

Radono srautas dėl konvekcijos priklauso nuo slėgio skirtumo, tuo pačiu ir nuo meteorologinių parametrų. Konvekcijos dėl slėgių skirtumo sąlygotas srautas charakterizuojamas Dersi dėsniumi [9]:

$$j = -\frac{K'}{\mu} \frac{dp}{dz} \quad (1.2)$$

čia: K' – aplinkos laidumas, m^2/s ;

μ – dinaminis oro klampumas $kg/m \cdot s$.

Bendras radono srauto tankis grunte yra komponentų dėl difuzijos ir konvekcijos suma. Tačiau yra daug išorinių faktorių, turinčių įtakos difuzijos procesui: krituliai, sniego danga, iššalas. Todėl tiesiogiai susieti radono tūrinį aktyvumą patalpose su jo tūriniu aktyvumu grunte nėra paprasta. Radono tūrinio aktyvumo kitimai grunte yra 10–1000 kartų didesni negu jo tūrinio aktyvumo kitimai patalpose [5]. Radono tūrinis aktyvumas grunte kinta dėl drėgmės kitimo ir nevienodo grunto laidumo įvairiose vietose.

Radono patekimo iš grunto į pastatų vidų greitį sąlygojantys faktoriai [10]:

- plyšiai pastato konstrukcijose (tarpai tarp rūšio sienų, prie kanalizacijos šulinių, prie elektros ir telefono kabelių, grindyse ir sienose);
- slėgis pastato viduje;

- grunto po pastatu laidumas;
- radono tūrinis aktyvumas grunto ore;
- radono ekshaliacijos greitis iš grunto po namu.

1.6 Radonas statybinėse medžiagose

Pasaulyje pasitaiko atveju, kai radonas, išsiskiriantis iš statybinių medžiagų, kartais yra radono pagrindiniu šaltiniu patalpose [11]. Tai yra namai, kurių statyboms buvo naudojamas betonas iš skalūnų, kuriose yra dideli kiekiai radžio. Radžio, kurio skilimo produktas - radonas, yra plytose, blokeliuose, cemento ir kitose statybinėse medžiagose. Tačiau naudojant mums įprastas statybines medžiagas radonas iš statybinių medžiagų daro nedidelę įtaką radono tūriniam aktyvumui patalpose.

Radiologinis statybinių medžiagų tinkamumo įvertinimas atliekamas atsižvelgiant į ^{226}Ra , ^{232}Th ir ^{40}K savituosius aktyvumus jose. Lietuvos higienos normoje HN 85:1998 „Gamtinė apšvita. Radiacinės saugos normos“ aktyvumo rodiklis skaičiuojamas pagal formulę (1.3), kuris yra susietas su žmonių gaunama apšvita [12]:

$$\frac{A_{\text{Ra}}}{300} + \frac{A_{\text{Th}}}{200} + \frac{A_{\text{K}}}{3000} \leq 1, \quad (1.3)$$

čia: A_{Ra} , A_{Th} , A_{K} – ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K savitieji aktyvumai, Bq/kg.

Jei aktyvumo rodiklis mažesnis už 1, statybinė medžiaga gali būti naudojama bet kokiais kiekiais visame name [12].

Gama spektrometriškai tiriant Lietuvoje pagamintas ir naudojamas statybines medžiagas nustatyta, kad jos negali būti pagrindinis radono šaltinis patalpoje. Darant prielaidą, kad statybinėse medžiagose ^{232}Th ir ^{40}K neaptikta, tai ^{226}Ra aktyvumas galėtų būti iki 300 Bq/kg [11].

Vertinti radono tūrinio aktyvumo patekimą iš statybinių medžiagų yra sudėtinga ir dėl skirtingų medžiagų skirtingos konvekcijos ir dėl to, jog namas statomas iš daugelio skirtingų statybinių medžiagų.

1.7 Radonas vandenyje

Radono kiekis vandenyje priklauso nuo radžio kiekio aplinkinėse uolienose, pirminėse uolienose ir vandenyje. Radono tūrinis aktyvumas paviršiniuose vandenyse yra labai mažas [13]. Didesnis radono aktyvumas būna grunte esančiame vandenyje. Radonas lengvai garuoja iš vandens. Naudojant vandenį namuose iš vandens išgaravęs radonas pasklinda patalpų ore ir taip padidina radono tūrinį aktyvumą patalpų ore. Radono patekimas iš vandens į patalpas yra mažas palyginti su radonu, patekusi iš grunto ar statybinių medžiagų. Tik 1–2 proc. radono, esančio patalpose, yra patekę iš vandens naudojamo patalpose – maudantis duše, naudojant virtuvėje ar kitur buityje.

Gerdamas vandenį turinčio radono, žmogus rizikuoja susirgti skrandžio vėžiu. 0,6 proc. visų skrandžio vėžio susirgimų yra dėl radono ir jo trumpaamžių skilimo produktų sąlygotos apšvitos [14].

Jungtinių tautų mokslinio komiteto jonizuojančiosios spinduliuotės efektams tirti ataskaitoje [15] pateikiama, kad pasaulyje gyventojų vidutinė apšvita nuo radono vandenyje yra 27 μSv , ir tai sudaro 1 proc. visos gyventojų apšvitos nuo jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinių. Matuojant radono kiekį geriamajame vandenyje Lietuvoje nustatyta, kad jis neviršija 30 Bq/l [15]. Buvo tiriamas tiek šulinių, tiek mineralinio vandens gręžinių vanduo. Leistinas radono tūrinis aktyvumas geriamajame vandenyje – 100 Bq/l [12]. Šie matavimų rezultatai leidžia daryti prielaidą, kad vanduo nėra pagrindinis veiksnys, sąlygojantis Lietuvoje radono tūrinį aktyvumą patalpose.

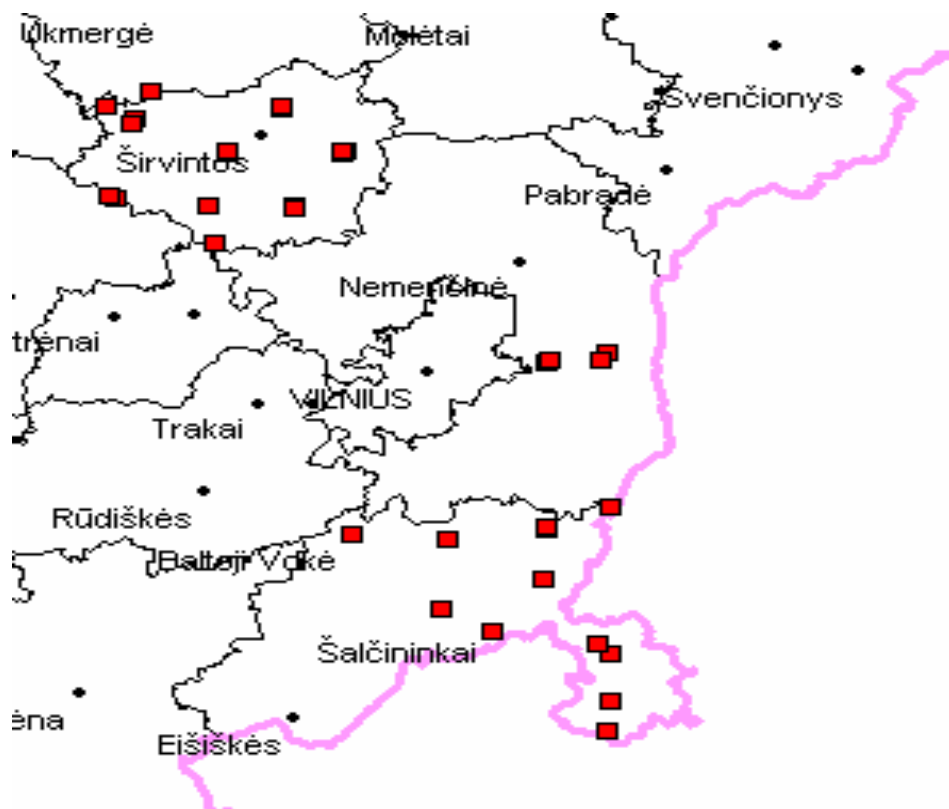
2. Tyrimo metodas ir objektai

2.1 Tyrimui parinkti objektai ir jų vieta

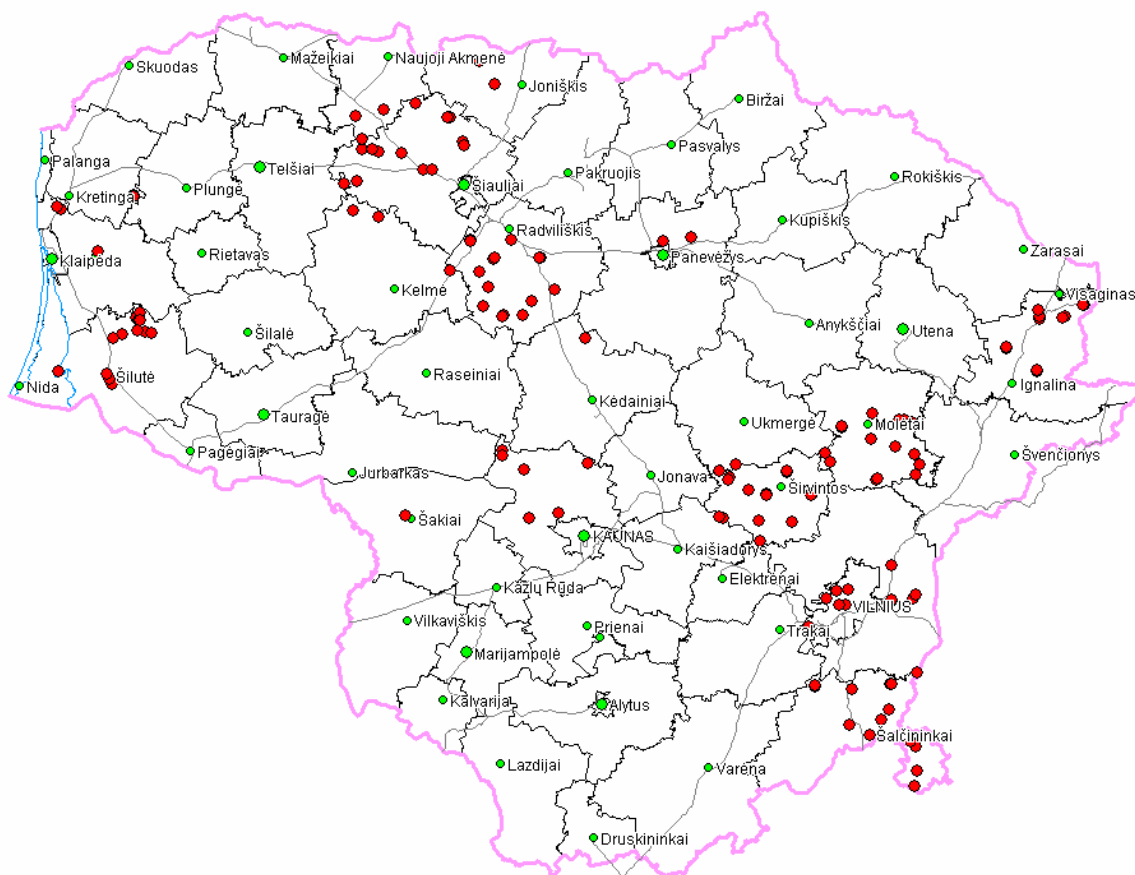
Radiologiškai buvo tiriami 22 Vilniaus, Šalčininkų, Širvintų rajono gyvenamieji namai (2.1 pav.). 2008–2009 metais namuose buvo tiriamas radono tūrinis aktyvumas ore, grunte, ant kurio stovi namas, vandenyje, kurį naudoja gyventojai namuose. Buvo tiriamos statybinės medžiagos, iš kurių pastatytas namas. Gavus tyrimo rezultatus buvo vertinamos dozės, kurias gauna žmogus nuo radono ir jo dukterinių skilimo produktų sąlygojamos apšvitos.

Papildomai palyginimui buvo ištirtas radono tūrinis aktyvumas 122 gyvenamuosiuose namuose ir kituose Lietuvos rajonuose. Tirti rajonai pažymėti 2.2 pav. Tiriamieji pastatai buvo pasirinkti atsitiktinai atskiruose rajonuose, remiantis Europos Sąjungos inicijuojama radono rizikos žemėlapiu sudarymo programa. Lietuvos žemėlapis suskirstytas 10x10 km² kvadratais, kiekviename kvadrato išrinkti atskiri du namai, kuriuose ir buvo tiriamas radono tūrinis aktyvumas.

Siekiant nustatyti radono tūrinio aktyvumo kaitą atskiru metų laiku, pasirinktas namas Panevėžio raj. Piniavos kaime. Gavus tyrimo rezultatus nustatyta, kaip radonas sąlygoja išorinės gama dozės spinduliuotę.



2.1 pav. Vilniaus regiono vieta, kuriose buvo tirtas radono tūrinis aktyvumas gyvenamuosiuose namuose, grunto ore ir geriamajame vandenyje



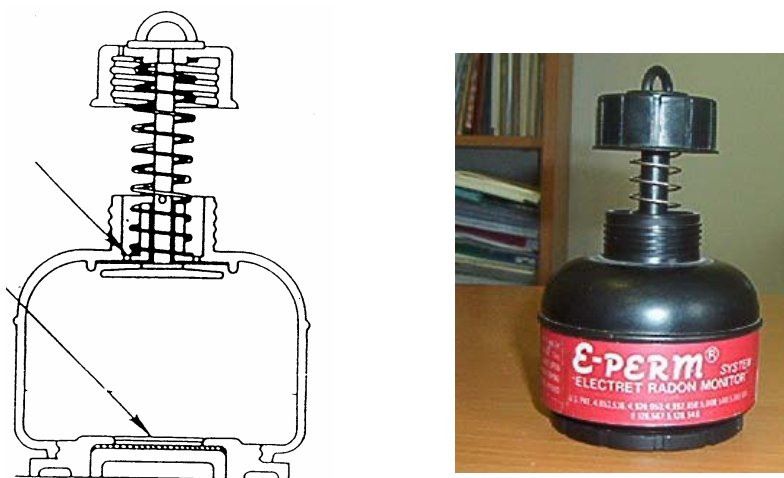
2.2 pav. Raudonai pažymėtos vietovės, kuriose tirtas radono tūrinis aktyvumas patalpose 2008–2009 metais

2.2 Radono tūrinio aktyvumo patalpose tyrimo metodika

Radono tūrinio aktyvumo patalpose tyrimams buvo naudojami E-PERMTM (angliškai *Electret Passive Environmental Radon Monitor*) elektretai (pagaminti JAV, Rad Elec Inc.) [17]. Ši tyrimo sistema susideda iš trijų komponentų: įelektrinto teflono^R disko, jonų kameros, pagamintos iš elektrai laidžios plastmasės, ir disko paviršiaus potencialo tyrimo prietaiso. Jonų kameros su disku schema parodyta 2.3 pav.

Teflono (Du Pont^R) diskas įelektrinamas jį gaminant. Prieš pradėdant radono tūrinio aktyvumo matavimą, nuo disko įelektrinto paviršiaus nuimamas apsauginis dangtelis, o diskas įsukamas į kameros dugne esančią angą. 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 yra proporcingas ant paviršiaus nusėdusių krūvių sumai [17].

Tyrimams atlikti naudoti jautresni trumpalaikio tyrimo elektreto diskai. Šie diskai naudojami, kai radono tūrinis aktyvumas arba tyrimo trukmė yra maži.



2.3 pav. Jonų kameros („S“ tipo) su teflono disku schema

Kameros viršuje yra filtru uždengtas įėjimas orui į kameros vidų, kurį uždarius uždengiamas ir disko paviršius, dėl to kameros viduje elektrinio lauko nebelieka ir matavimas nutraukiamas. Filtras kameros įėjime skirtas tam, kad į kameros vidų nepatektų radono skilimo produktai. Disko paviršiaus potencialo tyrimo prietaisas SPER-1 (angliškai *Surface Potential Electret Reader*) registruoja įelektrinto teflono paviršiaus potencialą.

Atidarius jonų kameros įėjimą ir pastačius ją tyrimo vietoje, radonas difunduoja per filtru uždengtą įėjimą į kameros vidų. Procesas pasyvus, todėl tyrimo metu kamerai nereikia jokių maitinimo šaltinių. Kadangi disko paviršius įelektrintas teigiamai, neigiamą krūvį turintys jonai nusėda ant disko, teigiamą – ant kameros sienelių vidinio paviršiaus. Norint nustatyti radono tūrinį aktyvumą tiriamojoje patalpoje, registruojamas disko paviršiaus potencialas tyrimo pradžioje ir pabaigoje bei tyrimo trukmė.

Vienos patalpos tyrimas buvo atliekamas laikant atvirą kamerą ne trumpiau kaip tris savaites. Detektoriai dedami ne žemesniame aukštyje kaip 50 cm nuo žemės. Atstumas nuo sienos turi būti ne mažesnis kaip 25 cm, iki šildymo prietaisų ir vėdinimo angų – 1,5 m. Tyrimai atliekami mažiausiai dviejose žemiausiai esančiose gyvenamosiose patalpose. Tyrimo metu yra išmatuojama ir gama dozės galia patalpose, tyrimams naudojant FH-10 dozės galios matuoklį (2.4 pav.).



2.4 pav. Dozės galios matuoklis FH-40

- **Kalibravimas**

Tyrimo įranga E-PERMTM, kuria matuojamas radono tūrinis aktyvumas patalpose, turi būti sukalibruota. Įranga kalibruojama jos gamintojo, kuris pateikia kalibravimo koeficientus, susiejančius elektretų potencialų skirtumą, foninės spinduliuotės dozės galią ir vidutinį radono tūrinį aktyvumą patalpose. Dozės galios matuokliai, naudojami gama dozės galiai matuoti, kalibruojami Vilniaus metrologijos centre vieną kartą per metus.

- **Radono tūrinių aktyvumų apskaičiavimas**

Radono tūrinis aktyvumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$A = \frac{I - F}{kT} - B \quad (2.1)$$

čia:

I – pradinis elektreto potencialas, V;

F – galinis potencialas, V;

k – kalibravimo koeficientas, bedimensinis dydis;

B – pataisa, įvedama atsižvelgiant į gama spinduliuotės įtaką elektreto potencialo pokyčiui, bedimensinis dydis.;

T - tyrimo trukmė, paromis.

„S“ tipo jonų kamerai ir trumpalaikio tyrimo elektretui kalibravimo koeficientas lygus:

$$k = 1,6978 + 0,0005742(I + F)/2 \quad (2.2)$$

„S“ tipo kamerai su ilgalaikio tyrimo elektretu kalibravimo koeficientas lygus:

$$k = 0,14 + 0,0000525(I + F)/2 \quad (2.3)$$

Kadangi disko paviršiaus potencialas mažėja veikiant ir foninei gama spinduliuotei, įvesta pataisa, kurios pagalba gauti rezultatai koreguojami atsižvelgiant į sugertosios gama dozės galią H :

$$B=0,322H \quad (2.4)$$

Sugertosios gama dozės galia čia matuojama nSv/h.

- **Matavimo neapibrėžties įvertinimas**

Sisteminė tyrimo paklaida susideda iš paklaidų, susijusių su:

- kameros tūriu, disko storiu ir kitais kameros parametrais;
- disko potencialo registravimu;
- foninės gama spinduliuotės sugertosios dozės galios kitimu.

Metodo sisteminė paklaida lygi:

$$EO = \sqrt{\left(\frac{I-F}{kT}\right)^2 (0,0025 + \frac{2}{(I-F)^2}) + (0,10K_f)^2} \quad (2.5)$$

Tyrimo rezultatai nepriklauso nuo oro temperatūros bet kurioms patalpoms būdingame temperatūrų diapazone. Tyrimai gali būti atliekami netgi esant 100 proc. santykiniam drėgnumui. Kadangi jonų kameros įėjime yra filtras, rezultatams įtakos neturi aerozolio dalelių ir jonų, esančių patalpoje, tipas ir koncentracija. Kamera pagaminta iš laidžios plastmasės, todėl tyrimų rezultatams neturi įtakos ir elektriniai laukai. Kadangi E-PERMTM sistema yra sukonstruota taip, kad jos santykinis jautris toronui yra tik 15 proc., jokios žymesnės įtakos toronas, esantis patalpose, radono tūrinio aktyvumo tyrimų rezultatams neturi. Vienintelis išorinis faktorius, turintis įtakos gautiems rezultatams, yra išorinės gama spinduliuotės sugertosios dozės galia.

2.3 Radono tūrinio aktyvumo tyrimų atskiru metų laiku metodika

Matavimams buvo pasirinktas prietaisas AlphaGuard PQ2000 (2.5 pav.) [18]. Naudojama monitoriuje esanti 0,56 litro aktyviojo tūrio jonizacinė kamera, į kurią radonas patenka per stiklo skaidulų filtrą, sulaikantį radono skilimo produktus. Matavimų paklaida, esant 250 Bq/m³ tūriniam aktyvumui, lygi 45 Bq/m³ vieno standartinio nuokrypio lygyje (neapibrėžties dydis yra fiksuojamas paties monitoriaus), minimalus matuojamas tūrinis aktyvumas – (0,5–1) Bq/m³, maksimalus – 2·10⁶ Bq/m³.



2.5 pav. Radono tūrinio aktyvumo monitorius AlphaGuard

2.4 Radono tūrinio aktyvumo matavimų grunto ore metodika

Matavimai atliekami su portatyviniu prietaisu Markus 10 (2.6 pav.) (gamintojas „Gammadata“, Švedija) [19].



2.6 pav. Radono tūrinio aktyvumo grunto ore matuoklis Markus 10

Matavimo metu grunto oras per vamzdį (zondą) iš (0,7–1,0) m gylio yra siurbiamas į matavimo kamerą. Priklausomai nuo grunto laidumo, siurbimo trukmė yra nuo 30 sekundžių iki 3 minučių (2.7 pav.).

Matavimo kameroje skylant radonui susidarę jo skilimo produktai, veikiami kameros viduje esančio elektrinio lauko, nusėda ant Ortec Ultra silicio detektoriaus (plotas – 100 cm², skiriamoji geba <16 keV), kuris registruoja jų skilimo metu spinduliuojamas alfa daleles. Siekiant išvengti fono kitimo poveikio, vieno kanalo impulsų analizatoriumi registruojamos tik ²¹⁸Po spinduliuojamos alfa dalelės. Matavimo trukmė apie 10 minučių, matavimų paklaida – 10 proc., kai radono tūrinis aktyvumas grunto ore lygus 50 kBq·m⁻³.



2.7 pav. Atliekami radono tūrinio aktyvumo matavimai grunto ore

2.5 Statybinių medžiagų tyrimų gama spektrometru metodika

Gama spektrometrija yra neardančios analizės metodas, skirtas identifikuoti gama radionuklidus ir išmatuoti jų savituosius aktyvumus [20]. Gama fotonams sąveikaujant su medžiaga, atsiranda antriniai elektronai. Yra trys gama fotonų sąveikos su medžiaga būdai:

- Komptono sklaida;
- fotoelektrinė sugertis;
- porų susidarymas.

Komptono sklaidos metu gama fotonas dalį savo energijos atiduoda medžiagos, kuria jis juda, elektronui. Šios sąveikos metu gama fotonas, išlaisvindamas elektroną iš atomo, praranda dalį energijos ir pakeičia savo judėjimo kryptį.

Kai gama fotono energija didesnė už 1,02 MeV, gama fotonas, sąveikaudamas su medžiaga, gali sukurti elektrono ir pozitrono porą. Atsiradusios elektringosios dalelės sąveikauja su medžiaga. Pozitrono anihilacija yra ypač svarbus procesas gama spektrometrijoje, nes jos metu atsiranda fotonas, kurio energija 511 keV.

Fotoelektrinės absorbcijos metu gama fotonas visą savo energiją perduoda medžiagos elektronui. Šio tipo sąveika naudojama gama spektrometrijoje. Kiekvienos iš šių sąveikų tikimybė priklauso nuo gama spinduliuotės energijos ir medžiagos atominio skaičiaus. Idealiame detektoriuje turėtų vykti tik fotoelektrinė sugertis.

Gama spektrometrijoje naudojamos dvi svarbios gama spinduliuotės savybės – tai, kad jos energija yra charakteringa ją spinduliuojančiam radionuklidui, ir tai, kad ši spinduliuotė yra monoenergetinė. Tuo naudojamosi identifikuoti, koks radionuklidas išspinduliuavo užregistruotą energiją. Fotoninė išeiga (tam tikros energijos fotono išspinduliuavimo tikimybė) taip pat yra

charakteringa gama radionuklidui. Ji naudojama nustatyti skylančių branduolių skaičiui, t. y. įvertinti radionuklidų aktyvumui.

Gama spektrometrų detektoriams naudojamos įvairios medžiagos. Tačiau natrio jodidas, aktyvuotas taliu, NaI(Tl), ir grynas germanis Ge dėl jų savybių yra naudojami plačiausiai. Gama fotonams nuo keliolikos keV registruoti paprastai naudojami šie du detektorių tipai [21].



2.8 pav. Gama spektrometras su Ge tipo detektoriumi

Statybinių medžiagų tyrimui naudotas Ge detektorius (2.8 pav.). Ge spektrometrinės sistemos yra naudojamos sudėtingiems spektrams analizuoti. Ge detektoriai gali dirbti tik skysto azoto temperatūroje. Ge spektrometrų savybės:

- fonas – spektras su pikais, kuriuos lemia ne mėginyje esantys, bet detektoriaus aplinkoje ir pačiame detektoriuje esantys radionuklidai, kosminės spinduliuotės sąveikos su detektoriaus aplinkoje esančiomis medžiagomis spinduliuotė;
- registravimo efektyvumas – santykis tarp per laiko vienetą užregistruotų fotonų ir fotonų, kuriuos išspinduliuoja šaltinis per laiko vienetą, skaičiaus;
- energijos skiriamoji geba (pilnas piko plotis ties puse maksimalaus aukščio, angliškas sutrumpinimas FWHM).

Pagrindiniai veiksmai, atliekami gama spektrometrijoje, yra šie:

- energetinis kalibravimas nustatant santykį tarp užregistruotos gama fotonų energijos ir kanalo, kuriame ši energija užregistruota. Tai daroma naudojant žinomų energijų gama fotonus spinduliuojančius radionuklidus;

- efektyvumo kalibravimas, nustatant gama spektrometrinės sistemos jautrumą. Gama spektrometrinės sistemos jautrumas yra nustatomas naudojant šaltinius, kuriuose esančių radionuklidų aktyvumai žinomi;
- fono nustatymas, kuris po to atimamas iš spektrų, užregistruotų tiriant mėginius;
- mėginio gama spektrometrinis tyrimas – spektro rinkimas;
- spektro analizė, kurios metu yra identifikuojami radionuklidai, esantys mėginyje, ir apskaičiuojami jų aktyvumai.

Radionuklidų savitieji aktyvumai skaičiuojami pagal formulę:

$$C = \frac{S}{\varepsilon t m \gamma} \quad (2.6)$$

čia:

C – savitasis aktyvumas; Bq/kg

S – piko plotas, imp;

ε – sistemos efektyvumas, bedimensinis dydis;

t – matavimo laikas (spektro rinkimo laikas), s;

m – mėginio masė, kg ;

γ – nagrinėjamąjį piką nulėmusių gama fotonų kvantinė išėiga, bedimensinis dydis.

Registravimo efektyvumas taip pat priklauso nuo fotonų sugėrimo mėginyje. Norint įvesti atitinkamą efektyvumo kalibravimo korekcijos daugiklį, kalibravimui naudojami radionuklidai būna įvairaus tankio matricose, pavyzdžiui, matricose, ekvivalentiškose vandeniui ar gruntui.

Vienas iš svarbiausių reikalavimų gama spektrometrijoje yra spektrometrinių sistemų efektyvumo kalibravimas, naudojant tokią pat geometriją, kokia naudojama mėginių gama spektrometrinių tyrimų metu (atkartojamą geometriją).

Taigi, gama spektrometrija yra gana paprastas tyrimų metodas, nereikalaujantis sudėtingų mėginio paruošimo procedūrų. Kita vertus, tai yra jautrus, aiškus ir nesunkiai kontroliuojamas metodas.

2.6 Radono geriamajame vandenyje tyrimų metodika

Vandens mėginiai buvo imami iš privačių šulinių ar namuose įrengtų vandentiekių remiantis radono vandenyje nustatymo metodu [22]. Radonas ir jo skilimo produktų tūrinis alfa aktyvumas matuojamas skysto scintiliatoriaus spektrometru Quantulus (2.9 pav.), mėginiams paruošti ir matuoti buvo naudojama Radiacinės saugos centro laboratorinė įranga.

Radono tūrinio aktyvumo nustatymas vandenyje skysčio scintiliacijos skaitikliu yra specifinis šiam radionuklidui. Radonas ekstrahuojamas iš vandens mėginių organiniu scintiliatoriniu tirpalu. Radono skilimo produktai lieka vandeninėje terpėje, tuo tarpu kai radonas visiškai ekstrahuojamas organiniu scintiliaciniu tirpalu. Prieš aktyvumo matavimą mėginys 3 val. laikomas pusiausvyrai tarp radono ir jo skilimo produktų pasiekti.



2.9 pav. Spektrometras Quantulus, kuriuo atlikti radono tūrinio aktyvumo vandenyje tyrimai

2.7 Radono ir jo skilimo produktų sąlygotos apšvitos vertinimo metodika

ICRP 65 publikacijoje yra pateikti koeficientai radono sąlygotos apšvitos dozei vertinti. Šie koeficientai gauti remiantis urano kalnakasių epidemiologinių tyrimų rezultatais [15]. Jie pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Perėjimo koeficientai, naudojami radono patalpose sąlygotai apšvitos dozei apskaičiuoti

Dydžiai	Vienetai	Vertė
Metinė ekspozicija, tenkanti vienetiniam radono tūriniam aktyvumui	$\text{mJ}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$	$1,56\cdot 10^{-2}$
Efektinė dozė, tenkanti vienetinei ekspozicijai	$\text{mSv}\cdot(\text{mJ}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$	1,1
Mirties tikimybė, tenkanti vienetinei ekspozicijai	$(\text{mJ}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$	$8\cdot 10^{-5}$

Šios lentelės koeficientai gauti laikant, kad žmogus per metus patalpose praleidžia 7 000 valandų, o radono skilimo produktų ir radono pusiausvyros koeficientas (santykis tarp radono skilimo produktų ir radono aktyvumų) lygus 0,4.

Laikoma, kad žmogus didžiąją savo laiko dalį praleidžia būdamas uždaroje patalpose, kuriose ir kaupiasi radonas, tuomet radono sąlygota apšvitos dozė apskaičiuojama pagal lygtį [23]:

$$E = C_{Rn} \times T \times 0,4 \times 9 \quad (2.7)$$

čia:

E – metinė efektinė dozė, Sv;

C_{Rn} – radono tūrinis aktyvumas, Bq/m³.

T – laiko trukmė, kurią vidutiniškai per metus praleidžia gyventojas patalpose, valandomis (laikoma kad žmogus praleidžia 7 000 valandų per metus);

0,4 – koeficientas, kuris rodo, kad tik 40 proc. įkvėpto radono kiekio turi įtakos žmogaus apšvitai, bedimensinis dydis;

9 – dozės koeficientas.

Vidinės apšvitos metinės efektinės dozės nuo vandenyje esančio radono skaičiuotos naudojant dozės koeficientą ($3,5 \cdot 10^{-9}$ Sv/Bq [23]) ir suvartojamą vandens kiekį vienam gyventojui per metus (500 litrų). Toks dozės įvertinimas yra konservatyvus. Vertinant realistiškiau, atsižvelgta į tai, kad suvartojamo žalio vandens kiekis yra mažesnis nei 1,5 litro per dieną. Realistiškiau dozės įvertintos laikant, kad žalio vandens suvartojama 60 litrų per metus. Vidutinė metinė efektinė vidinės apšvitos dėl radono geriamajame vandenyje dozė skaičiuojama pagal lygtį:

$$E = C_{vand} \times DF \times l \quad (2.8)$$

čia:

E – efektinė dozė per metus, Sv;

C_{vand} – radono tūrinis aktyvumas vandenyje, Bq/L;

DF – dozės koeficientas, Sv/Bq;

l – suvartojamo vandens kiekis per metus, l.

Vertinant gyventojų apšvitą nuo gama spinduliuotės, remiamasi UNSCEAR rekomendacijomis [23]. Vertinant apšvitą nuo gama dozės patalpose laikoma, jog žmogus 80 proc. laiko praleidžia uždaroje patalpose, pagrindinai gama spinduliuotės šaltiniai yra statybinės medžiagos. Efektinė dozė skaičiuojama pagal lygtį [23]:

$$E = H \times T \times 0,7 \quad (2,9)$$

čia:

H – lygiavertė dozė, Sv/h;

T – laiko trukmė, kurią vidutiniškai per metus praleidžia gyventojas patalpose, valandomis (laikoma, kad žmogus praleidžia 7 000 valandų per metus);
 $0,7$ – dozės koeficientas, Sv/Gy.

3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

3.1 Kompleksiniai radiologiniai tyrimai Vilniaus regione

Radono tūrinio aktyvumo tyrimų rezultatų aptarimas.

Atliekant tyrimus Vilniaus regione, kompleksiniai tyrimai buvo atlikti 22 namuose ir jų aplinkoje. Tyrimo metu buvo tiriamas radono tūrinis aktyvumas patalpų ore, grunto ore, vandenyje. Gama spektrometriniu būdu buvo iširtos statybinės medžiagos, iš kurių pastatytas namas. Iš gautų tyrimo rezultatų šiose terpėse buvo įvertinta efektinė dozė, kurią gauna žmogus praleisdamas laiką namuose. Tyrimo rezultatų vidutinės vertės pateiktos 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Tirtų namų Vilniaus regione patalpų ore, grunto ore bei geriamajame vandenyje išmatuoti radono tūriniai aktyvumai su 95 proc. pasikliautiniu intervalu bei kitimo intervalais

Rajonas	Radono tūrinis aktyvumas		
	patalpose, Bq/m ³	vandenyje, Bq/m ³	grunto ore, kBq/m ³
Vilniaus	38±18 (28÷57)	13±8 (5,8÷20)	19±8 (13÷27)
Širvintų	50±13 (22÷141)	9,0±2,2 (3,2÷12,5)	12±7 (4÷34)
Šalčininkų	84±28 (28÷141)	5,2±0,3 (4,3÷5,8)	9±4 (2÷21)
Vidutinė vertė regione	66±39 (22÷141)	8,2±2 (3,2÷20)	12±4 (2÷34)

Didžiausia radono tūrinio aktyvumo patalpose vidutinė vertė išmatuota Šalčininkų rajone, mažiausia – Vilniaus. Vertės skiriasi daugiau nei du kartus. Iš išmatuotų verčių intervalo matyti, jog didžiausias radono patalpose tūrinis aktyvumas Vilniaus rajone buvo mažesnis už viso regiono vidurkį. Širvintų ir Šalčininkų rajone didžiausi išmatuoti radono tūriniai aktyvumai patalpose – 141 Bq/m³, tačiau Širvintų rajono radono tūrinio aktyvumo patalpose vidutinė vertė yra mažesnė už regiono vidutinę vertę.

Atlikus t-testą tarp rajonų radono tūrinio aktyvumo statistiškai patikimo skirtumo nenustatyta. Šalčininkai – Širvintos $p = 0,3$, Šalčininkai – Vilnius $p = 0,03$, Širvintos – Vilnius $p = 0,13$.

Išanalizavus rezultatus ir paskaičiavus koreliaciją tarp radono grunte ir radono patalpų ore, koreliacijos nenustatyta, $r = -0,26$. Todėl iš gautų rezultatų negalima daryti išvados, kad radono

aktyvumas tirtose patalpose priklauso nuo radono aktyvumo grunto ore. Tai parodo kitų faktorių įtaką radono tūriniam aktyvumui patalpose.

- **Metinės efektinės dozės dėl radono patalpose ir geriamajame vandenyje palyginimas**

Įvertinta efektinė dozė, kurią žmogus gauna būdamas namuose nuo radono patalpų ore bei radono geriamajame vandenyje. Taip pat įvertinta išorinė dozė nuo gama spinduliuotės. Tyrimo rezultatai pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Vidutinės metinės radono sąlygotosios apšvitos dozės gyventojui nuo radono patalpų ore ir vandenyje

Rajonas	Vidutinė metinė efektinė dozė nuo radono			vidutinė metinė efektinė dozė nuo gama spinduliuotės, mSv
	patalpų ore, mSv	geriamajame vandenyje, μ Sv (suvartojant 500 litrų vandens per metus)	geriamajame vandenyje, μ Sv (suvartojant 60 litrų vandens per metus)	
Vilniaus	0,9	66	5,7	0,6
Širvintų	1,3	16	1,9	0,6
Šalčininkų	2,1	9	0,1	0,5
Vidutinė vertė regione	1,4	14	1,7	0,56

Gauti rezultatai rodo, kad didžiausią metinę efektingą dozę žmogus gauna nuo radono patalpų ore. Remiantis gautais rezultatais didžiausią apšvitą tirtame regione nuo radono patalpose gauna Šalčininkų rajono gyventojas – 2,1 mSv per metus, tačiau šio rajono gyventojas, išgerdamas vidutiniškai 60 litrų per metus geriamojo žalio vandens, gauna mažiausią apšvitą nuo radono vandenyje – 0,1 μ Sv. Mažiausią apšvitą nuo radono patalpų ore gauna žmogus, gyvenantis Vilniaus rajone, ir ji lygi 0,9 mSv, tačiau šio rajono gyventojai gauna didžiausią apšvitą nuo radono geriamajame vandenyje – 5,7 μ Sv per metus.

Vidinė apšvita nuo radono yra 3 kartus didesnė nei gama spinduliuotės nulemta išorinė apšvita.

- **Metinės efektinės dozės dėl radono iš skirtingų statybinių medžiagų pastatytų pastatų patalpose palyginimas**

Regiono buvo ištirti 11 plytinių, 5 mediniai, 4 namai, pastatyti iš medžio, bet apmūryti silikatinėmis plytomis, 2 betoninių plokščių namai. Tyrimo rezultatai 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Metinės efektinės apšvitos dozės atskirų tipų namuose

Statybinė medžiaga, iš kurios pastatytas namas	Radono sąlygota efektinė vidinė apšvitos dozė, mSv/metai	Gama spinduliuotės patalpose sąlygota išorinė efektinė dozė, mSv/metai
Betonas	0,9	0,4
Medis	1,6	0,6
Medis-plytos	1,8	0,5
Plytos	1,4	0,6

Gauti rezultatai rodo, jog didžiausią metinę efektinę dozę nuo radono ir jo skilimo produktų sąlygotos apšvitos gauna žmonės, gyvenantys apmūrytuose mediniuose namuose. Mažiausią apšvitą gauna gyventojai, gyvenantys iš betono blokų sukonstruotuose namuose, tai galima paaiškinti geru inžinieriniu barjeru, neleidžiančiu radonui patekti iš grunto į pastato vidų.

Didžiausią apšvitą nuo radono patalpose žmonės gauna gyvenantys apmūrytuose mediniuose namuose. Tai gali būti todėl, kad apmūrijus namą, jo sienose susikaupęs radonas pro plyšius medinėse sienose patenka greičiau į pastato vidų, nei pro mūrinės sienas į kiemą.

Statybinių medžiagų tyrimai atlikti gama spektrometriniu metodu. Gamtinių radionuklidų savitųjų aktyvumų rezultatai pateikti 3.4 lentelėje. Tiriant statybines medžiagas buvo nustatyta, kad gamtinių radionuklidų savitieji aktyvumai medyje yra daug mažesni už aktyvumus kitose statybinėse medžiagose. Lyginant betoną su mediena, radžio aktyvumas yra 5 kartus didesnis betone nei medienoje (3.4 lentelė), o radono tūrinis aktyvumas patalpoje didesnis mediniuose namuose. Tad galime teigti, jog radono tūrinis aktyvumas nuo statybinės medžiagos nepriklauso.

3.4 lentelė. Gamtinės kilmės radionuklidų aktyvumų vidurkiai kai kuriose statybinėse medžiagose ir statybinių medžiagų aktyvumo rodiklis

Statybinės medžiagos arba gaminiai	Savitieji aktyvumai, Bq/kg			Aktyvumo rodiklis
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	
Betonas	33	17	398	0,32
Cementas	34	17	376	0,32
Plytos	31	20	385	0,33
Smėlis	28	15	392	0,30
Žvyras	32	16	379	0,31
Mediena	1,3	12	4	0,06
Pjuvenų ir betono blokai	13	16	275	0,22

3.2 Radono tūrinio aktyvumo tyrimai patalpų ore 2008-2009 metais

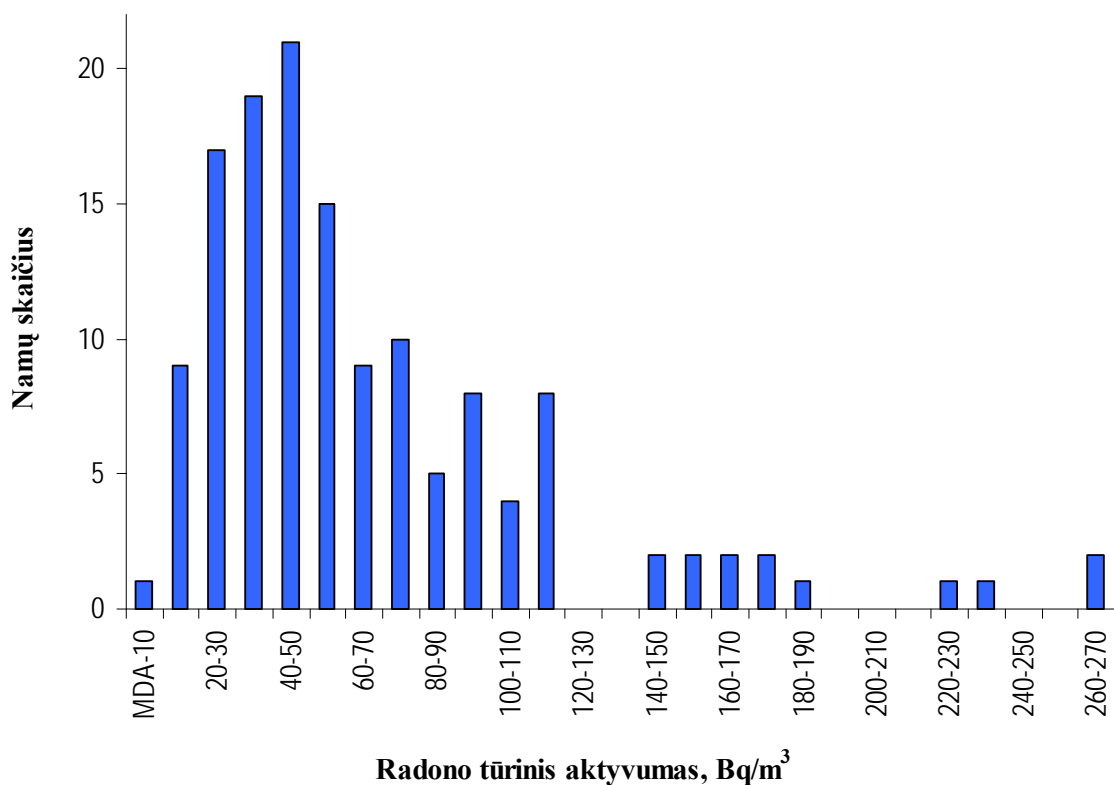
2008–2009 metais ištirti 120 namai atskiruose Lietuvos rajonuose, tyrimo rezultatai 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. Radono tūrinio aktyvumo vidurkiai su 95 proc. pasikliautiniu intervalu, bei svyravimo intervalu, atskiruose Lietuvos rajonuose

Rajonas	Radono tūrinis aktyvumas, Bq/m ³	Svyravimo intervalas, Bq/m ³
Ignalina	61±18	21÷111
Kaunas	49±17	24÷92
Kelmė	59±29	34÷103
Klaipėda	91±26	72÷117
Molėtai	102±35	12÷261
Šakiai	46±15	4÷11
Šiauliai	53±16	17÷110
Šilutė	74±29	16÷171
Vidurkis Lietuvoje (1995–1998 metai)	55±4	-

Atlikus šiuos tyrimus yra galimybė palyginti jų rezultatus su Vilniaus regiono rezultatais. Radono tūrinio aktyvumo vidurkis tirtuose rajonuose yra 67 Bq/m³, tirtame Vilniaus regione 66 Bq/m³. Apskaičiuotas radono tūrinis aktyvumas Lietuvoje 1995–1998 metais yra 55 kBq/m³. Vilniaus vidutinės radono tūrinio aktyvumo vertės yra artimos viena kitai. T-testu nustatyta, kad statistiškai patikimo duomenų skirtumo tarp tiriamo Vilniaus regiono ir kitų Lietuvos regionų nėra, $p = 0,4$. Taigi ištirtas Vilniaus regionas atitinka kitų Lietuvos regionų matavimus.

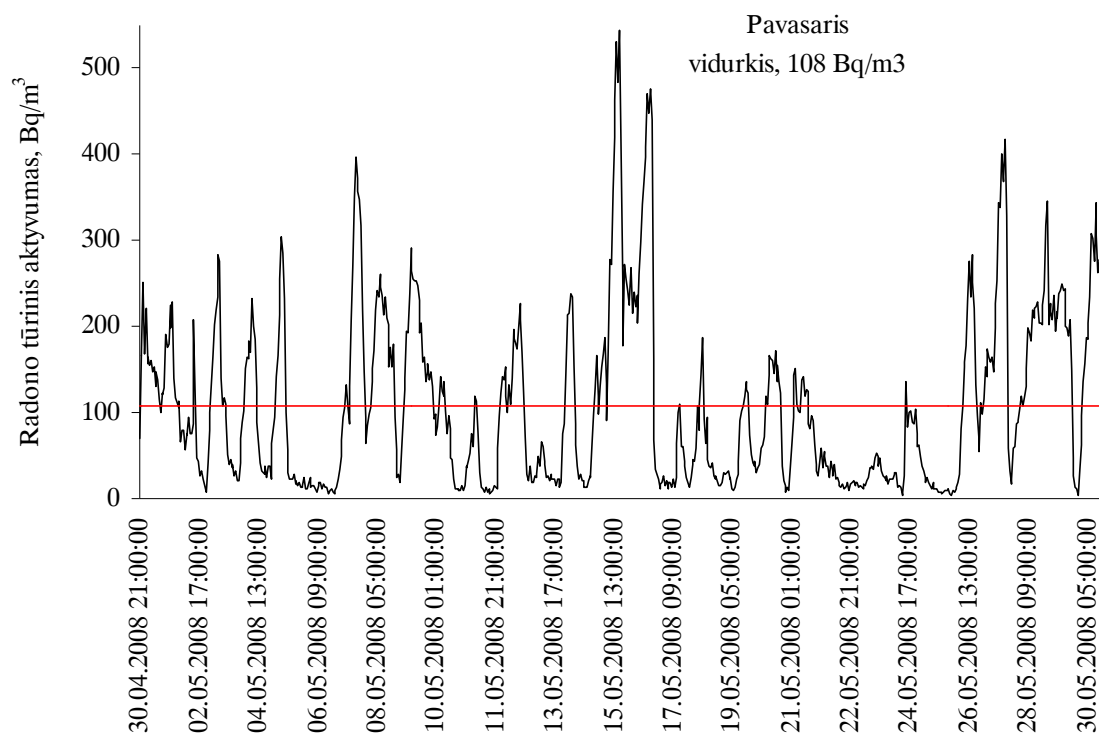
Vertinant namų pasiskirstymą pagal radono tūrinį aktyvumą, nubrėžtas grafikas (3.1 pav.). Iš gautų rezultatų matoma, kad daugiausiai namų, kurių patalpose radono tūrinis aktyvumas yra 40–50 Bq/m³. Nustatyta, kad radono tūrinis aktyvumas yra nuo 20 iki 80 Bq/m³ daugelyje namų, tik pavieniuose namuose nustatytas aktyvumas, didesnis nei 150 Bq/m³.



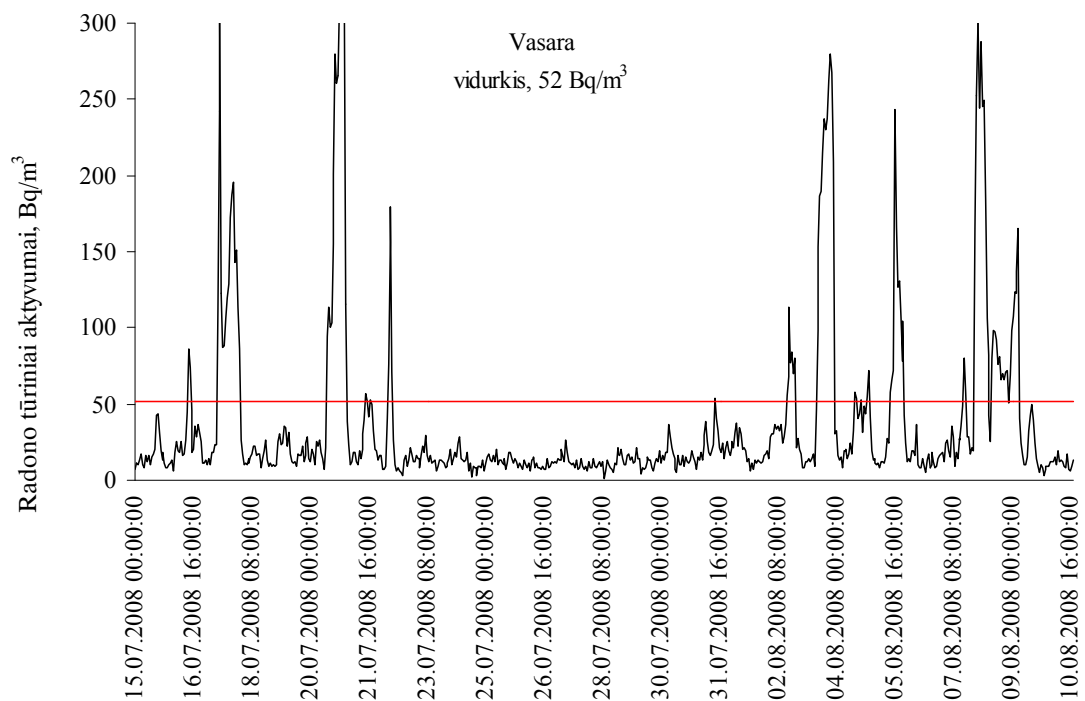
3.1 pav. Radono tūrinių aktyvumų pasiskirstymas atskiruose namuose, MDA – minimalus registruojamas savitasis aktyvumas – 1 Bq/m³

3.3 Radono tūrinio aktyvumo kaitos tyrimai atskiru metų laiku

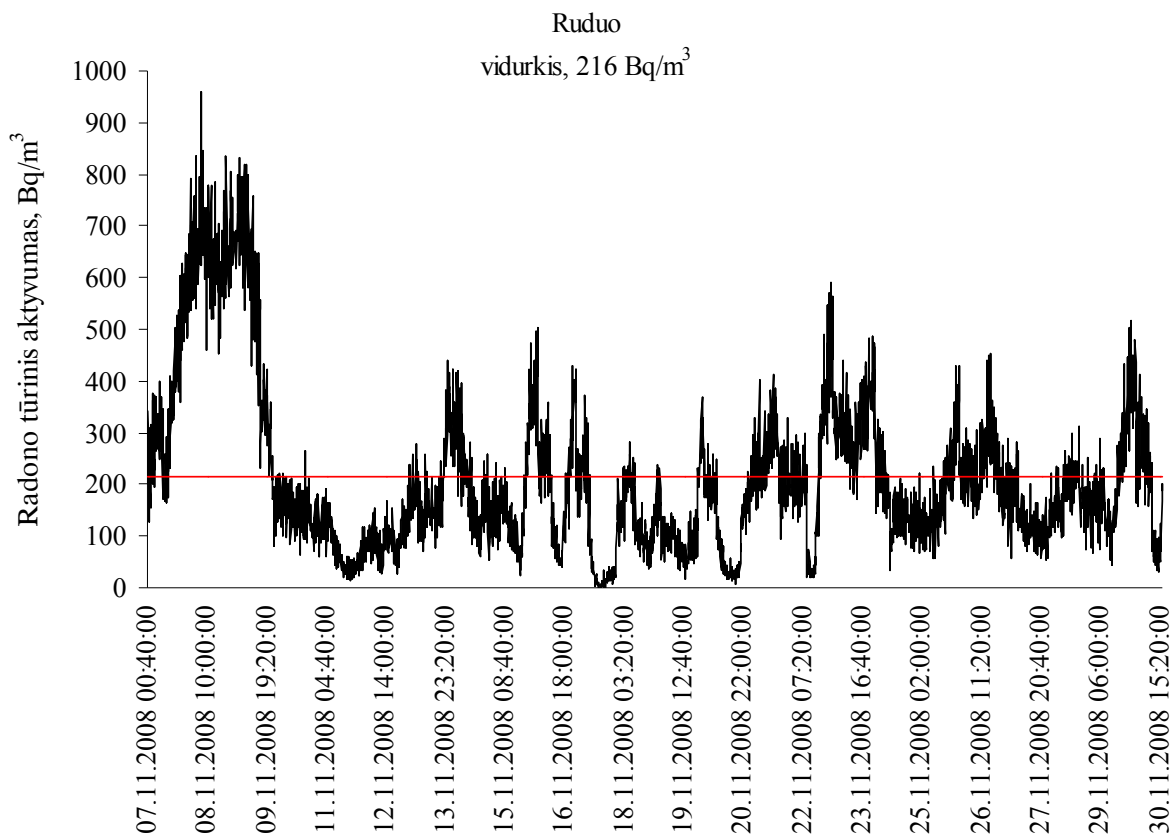
Radono tūrinio aktyvumo tyrimai buvo atlikti individualiame name Panevėžio rajone, Piniavos kaime 2008–2009 metais. Tyrimai buvo atlikti gyvenamajame name be rūšio, pirmajame aukšte esančiame kambaryje. Šalia tiriamosios patalpos išmatuotas radono tūrinis aktyvumas grunto ore 53 kBq/m³. Matuojant E-PERMTM elektretais, radono tūrinis aktyvumas buvo 288 Bq/m³, matavimai atlikti pavasarį. Detalesniems tyrimams buvo pasirinktas radono tūrinio aktyvumo monitorius AlphaGuard. Tirta po vieną mėnesį, pavasarį, vasarą, rudenį ir žiemą. Tyrimo rezultatai pateikti (3.2, 3.3, 3.4, 3.5 pav.). Visuose paveiksluose raudona linija žymi radono tūrinio aktyvumo tyrimų vidurkį.



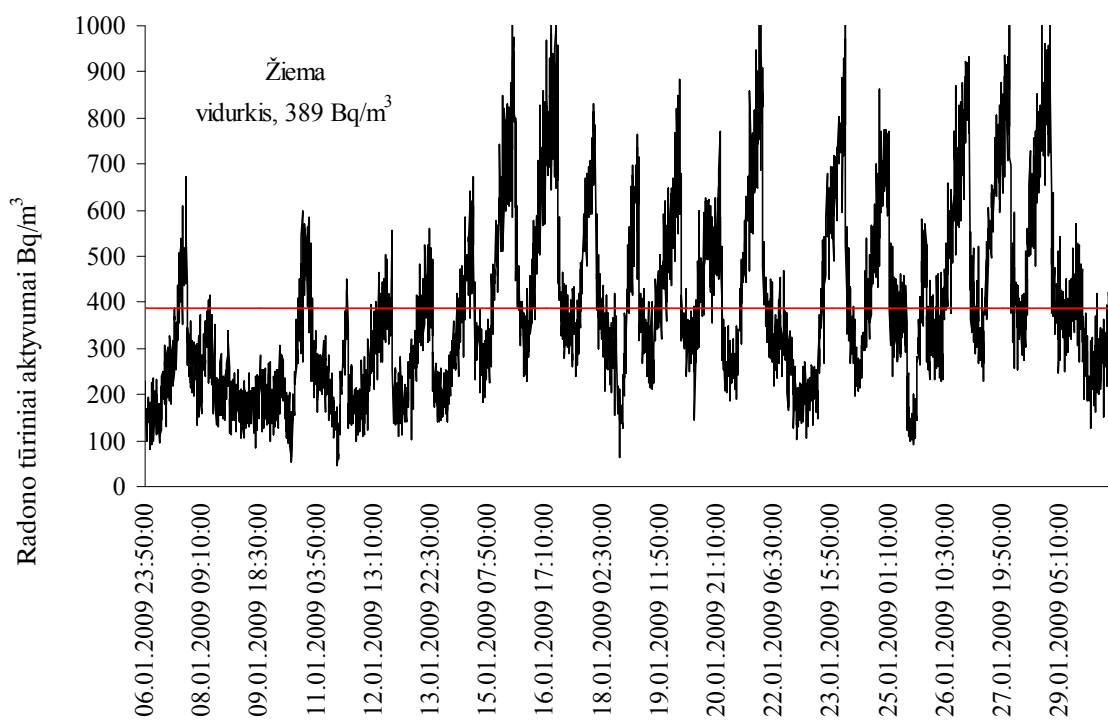
3.2 pav. Radono tūrinio aktyvumo matavimai 2008 metų pavasarį



3.3 pav. Radono tūrinio aktyvumo matavimai 2008 metų vasarą



3.4 pav. Radono tūrinio aktyvumo matavimai 2008 metų rudeni



3.5 pav. Radono tūrinio aktyvumo matavimai 2009 metų žiemą

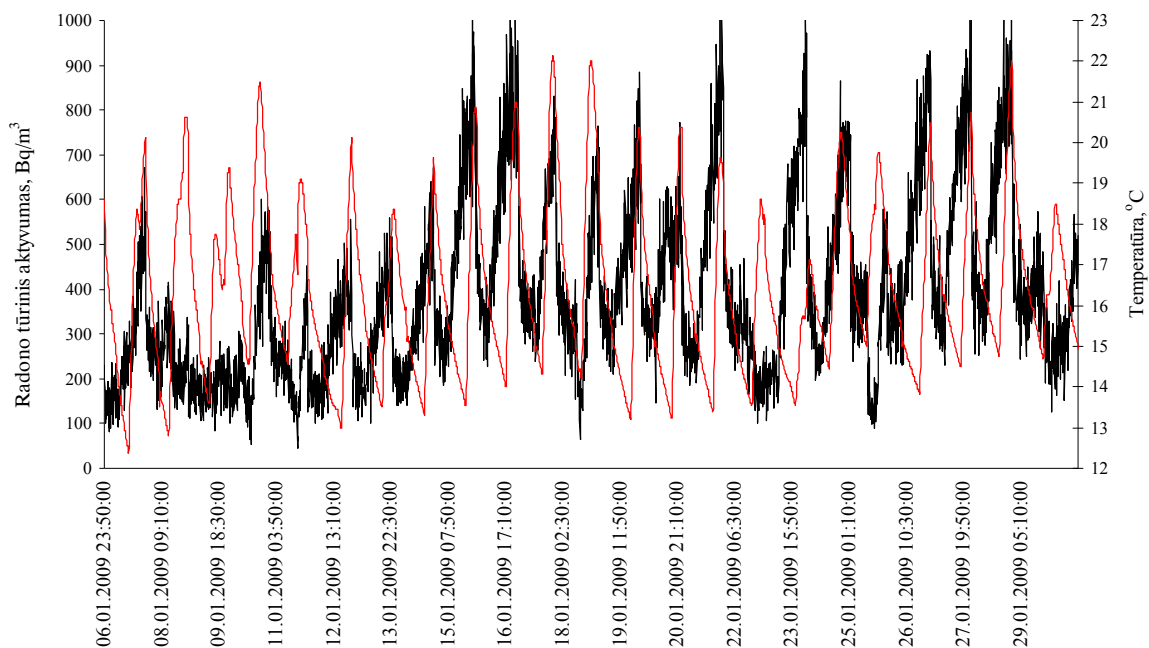
Iš gautų duomenų nustatyta, kad radono tūrinis aktyvumas matavimų patalpoje kito nuo 1 Bq/m³ iki 1048 Bq/m³. Radono tūrinių aktyvumų aritmetinis vidurkis skirtingu metų laiku yra skirtingas, rezultatai pateikti 3.6 lentelėje.

3.6 lentelė. Radono tūrinio aktyvumo bei gama dozės galios matavimo rezultatų vidurkiai su 95 proc. pasikliautinu intervalu skirtingu metų laiku

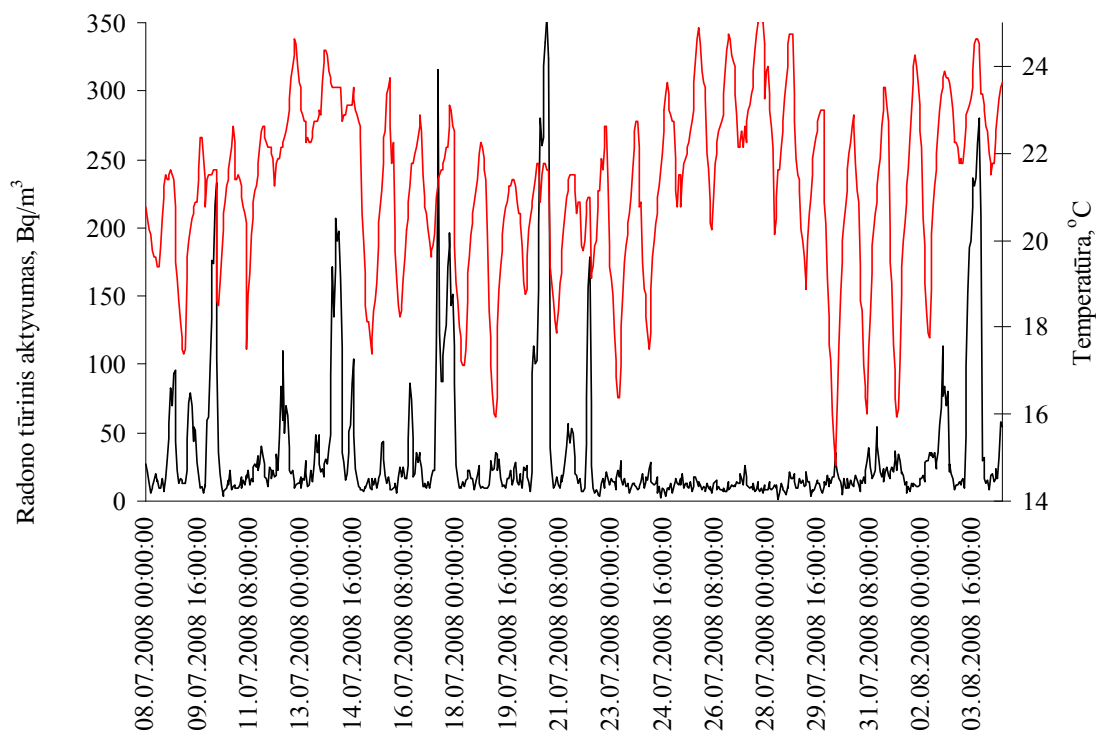
Metų laikas	Radono tūrinio aktyvumo vidurkis, Bq/m ³	Gama dozės galios vidurkis, nSv/h
Pavasaris	108±7	124±1
Vasara	52±7	122±1
Ruduo	213±5	120±1
Žiema	387±7	123±1

Didžiausias vidutinis aktyvumas užfiksuotas žiemą – 387 Bq/m³, mažiausias – vasarą – 52 Bq/m³. Todėl galima teigti, kad radono tūrinis aktyvumas šiame name labai priklauso nuo patalpų vėdinimo, kadangi vasarą patalpos būna nuolatos vėdinamos, o žiemą užsandarinamos. Taip pat dėl skirtingų radono patekimo greičių į patalpas iš grunto. Skirtingu metų laiku skirtingi slėgių skirtumai tarp grunto ir patalpų oro. Žiemą šis skirtumas didesnis nei vasarą.

Radono tūrinio aktyvumo priklausomybė nuo temperatūros pateikta (3.6, 3.7 pav.), Atskirai pateikti matavimai atlikti vasaros ir žiemos metu. Iš šių paveikslėlių matyti, kad kintant temperatūrai kinta ir radono tūrinis aktyvumas. Temperatūrai didėjant slėgių skirtumas tarp oro pastato viduje ir po pastatu kinta. Esant didesniam oro slėgių skirtumui vyksta greitesnė oro konvekcija, taip radonas su kitu oru iš po pamatų patenka į patalpas pro plyšius pamatuose. Kuo didesnis temperatūrų svyravimas, tuo didesnis ir radono tūrinis aktyvumas pastato viduje. Temperatūros faktorius, lemiantis radono tūrinį aktyvumą patalpose, labiau išryškėja žiemą, lyginant su vasara. Tai lemia dirbtinis šildymas pastato viduje, temperatūra per trumpą laiko tarpą pakyla ar nukrenta, šis kitimas sąlygoja didesnę oro srautų maišymąsi pastate ir po juo, radonas iš po namo greičiau ir lengviau patenka į pastatą. Vasarą temperatūros faktorius nebedominuoja atsirandant radonui pastate.

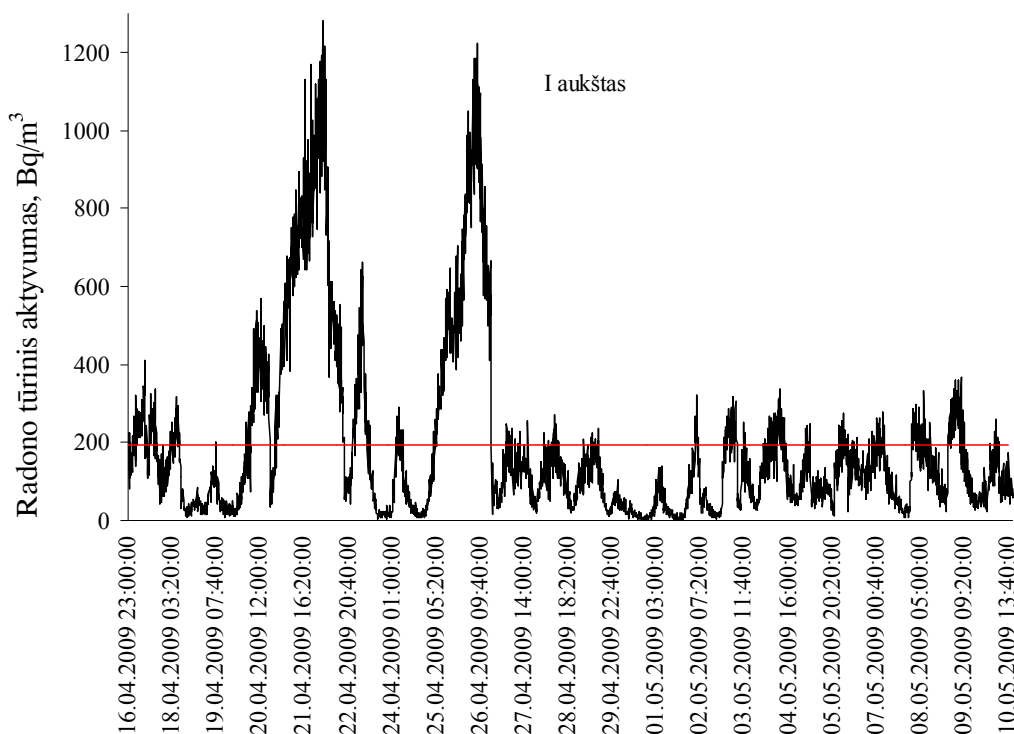


3.6 pav. Radono tūrinio aktyvumo ir temperatūros kitimas žiemą. Raudona linija žymi temperatūros kitimą, juoda linija žymi radono tūrinio aktyvumo kitimą

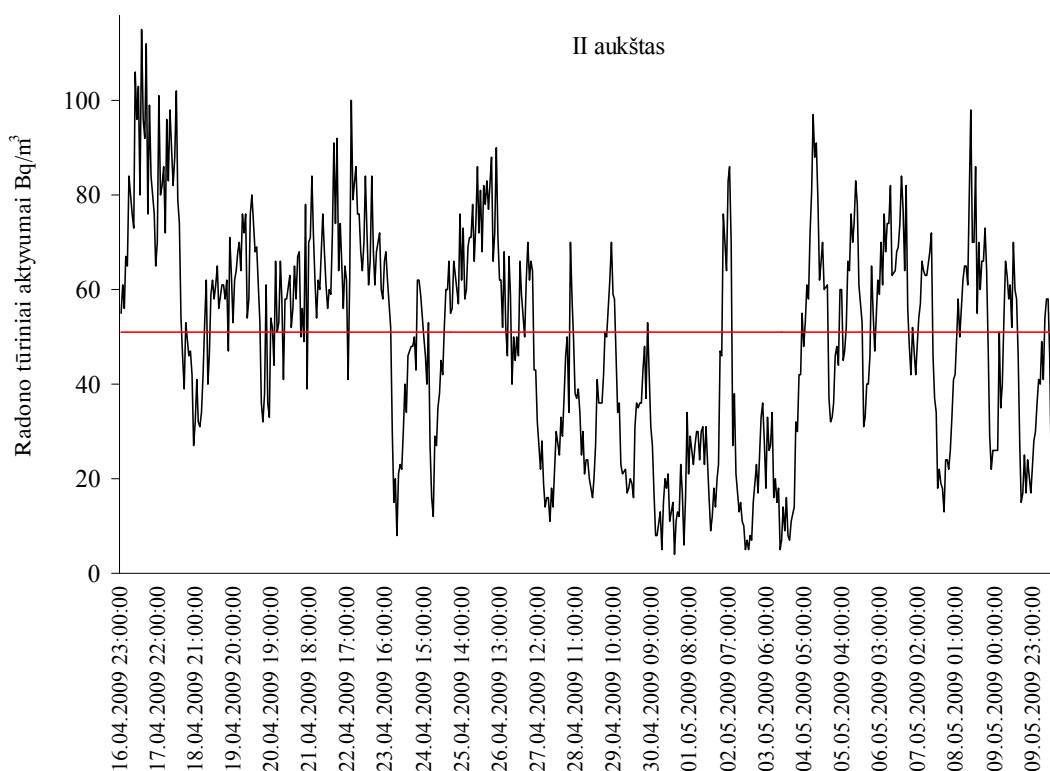


3.7 pav. Radono tūrinio aktyvumo ir temperatūros kitimas vasara. Raudona linija žymi temperatūros kitimą, juoda linija žymi radono tūrinio aktyvumo kitimą

Siekiant įvertinti grunto įtaką radono tūriniam aktyvumui patalpų ore, matavimai atlikti vienu metu skirtinguose namo aukštuose. Tyrimo grafikai pateikti (3.8, 3.9 pav.).



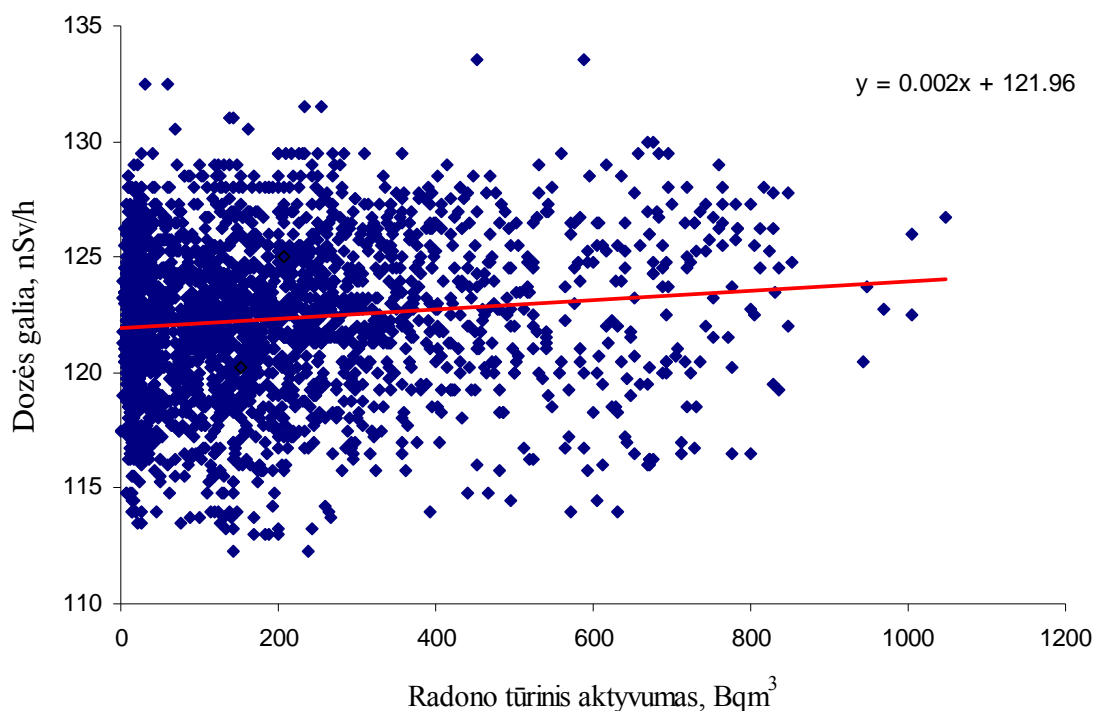
3.8 pav. Radono tūrinis aktyvumas pirmame aukšte.
Raudona linija žymi radono tūrinio aktyvumo vidurkį – 197 Bq/m³



3.9 pav. Radono tūrinis aktyvumas antrame aukšte.
Raudona linija žymi radono tūrinio aktyvumo vidurkį – 51 Bq/m³,

Iš gautų grafikų matyti, kad radono tūriniai aktyvumai skirtinguose aukštuose yra skirtingi. Pirmame aukšte radono tūrinis aktyvumas žymiai didesnis už radono tūrinį aktyvumą antrame aukšte. Taigi pagrindinis radono šaltinis yra gruntas, ant kurio stovi namas. Antrame aukšte radono tūrinis aktyvumas žymiai sumažėja, nes nėra tiesioginio kontakto su gruntu. Atlikus t-testą aptiktas statistiškai patikimas skirtumas tarp radono tūrinio aktyvumo pirmame ir antrame aukšte ($p < 0,01$).

Siekiant įvertinti išorinę radono skilimo produktų sąlygojamą gama spinduliuotę, nubrėžtas grafikas (3.10 pav.). Remiantis gautais rezultatais galime teigti, jog dozės galia nuo radono tūrinio aktyvumo nepriklauso. Kintant radono tūriniam aktyvumui įvairiais metų laikais, gama dozė beveik nekinta (3.6 lentelė). Taip pat įvertinta, kad 1 Bq/m^3 lemia tik $0,002 \text{ nSv/h}$ dozę (3.10 pav.). Taip yra todėl, kad radono skilimo produktų, esančių ore, spinduliuojama gama dozė yra nedidelė, palyginti su gamtinių radionuklidų statybinėse medžiagose spinduliuojama gama spinduliuote. Todėl radono skilimo produktų gama spinduliuotė yra nereikšminga vertinant žmogaus apšvitą.



3.10 pav. Dozės galios priklausomybė nuo radono dukterinių skilimo produktų spinduliuojamų gama spindulių

Išvados

1. Ištyrus Vilniaus regione radono tūrinį aktyvumą patalpų ore, nustatyta, kad radono tūrinis aktyvumas statistiškai patikimai nesiskiria nuo kitų Lietuvos regionuose gautų tyrimo rezultatų ir nustatyta vidutinė radono tūrinio aktyvumo patalpose vertė Vilniaus regione, kuri lygi 67 Bq/m^3 ;
2. Ištyrus Vilniaus regione radono tūrinį aktyvumą geriamajame vandenyje, aktyvumai neviršija nustatyto Lietuvos higienos normos HN-85:2003 leistino lygio t. y. 100 Bq/l ir nustatytas vidutinis radono tūrinis aktyvumas vandenyje tirtame regione, lygus 12 Bq/m^3 ;
3. Įvertinta, kad Vilniaus regione žmogus, būdamas patalpose, gauna vidutinę metinę vidinę apšvitą nuo radono patalpų ore, lygią $1,4 \text{ mSv}$, ir nuo radono geriamajame vandenyje, lygią $1,7 \mu\text{Sv}$;
4. Darbe įvertinta, kad radono skilimo produktai, kurių tūrinis aktyvumas patalpose yra lygus 1 Bq/m^3 nulemia $0,002 \text{ nSv/h}$ išorinę gama spinduliuotę;
5. Ištyrus radono tūrinį aktyvumą grunto ore ir patalpų ore, koreliacija tarp šių komponentų dėl nepakankamo statistiškai patikimo duomenų kiekio nenustatyta;
6. Darbe nustatyti keli faktoriai, kurie sąlygoja radono tūrinį aktyvumą pastate - metų sezonas, šildymo laikotarpis, temperatūros kaita pastato viduje, patalpos aukštis nuo grunto.

Anotacija

Darbe pateikiami Vilniaus regione atliktų radono tūrinių aktyvumų, patalpų ore, grunto ore ir gyventojų vartojamame vandenyje, tyrimų rezultatai. Tyrimai atlikti 2008 metais Vilniaus, Šalčininkų ir Širvintų rajonuose, ištirti 22 namai ir jų aplinka. Gavus tyrimo rezultatus įvertintos apšvitos dozės, kurias gauna gyventojai nuo radono patalpose ir geriamajame vandenyje. Įvertintas ryšys tarp radono grunte ir radono patalpose. Radono tūrinio aktyvumo patalpų ore tyrimo rezultatai palyginti su kitais 2008–2009 metais Lietuvoje atliktais matavimais. Pasirinkus vieną namą Panevėžio rajone ištirtas radono tūrinio aktyvumo kitimas.

Summary

Indoor radon is most important expose for human population. It is necessary to investigate reasons of increasing of radon concentration. It is known that radon concentrations are highly variable within a region. This work deals with the investigations of indoor radon and radon in water in dwellings of Vilnius region. Measurements of radon in soil were performed as well. Measurements were made at 22 private dwellings and surrounding off them in 2008 year. Statistically estimated that this region is not different from others Lithuanian districts. Effective dose for public due to indoor radon and radon in water were estimated. Results showed that the highest effective dose due to the indoor radon for public in Vilnius region is 2.1 mSv per year, highest effective dose due to radon in drinking water 5.7 μ Sv per year.

No correlation founded between radon in soil and indoor radon in may investigation. So there are other factors that influence increase of radon concentration in buildings: engineering barrier, air conditions and others.

Variation of indoor radon concentrations in a dwelling survey has been carried out in Panevezys districts in the village of Pinava. Indoor radon levels were measured in selected dwelling in autumn, winter, spring and summer seasons using radon monitor AlphaGuard. The average radon concentrations vary from 52 Bq/m³ in summer to 289 Bq/m³ in winter. Relation between first and second flour was estimated, its shows that radon concentrations on first flour are triple higher then in second flour. The annual mean effective dose received by the people living in this dwelling has been calculated and it was 4.8 mSv.

Literatūros sąrašas

1. Valiukėnas V., Makariūnienė E., Morkūnas G. Jonizuojančios spinduliuotės ir radiacinės saugos terminų žodynas. V: Radiacinės saugos centras, 1999, p. 152.
2. Butkus D. Jonizuojančioji spinduliuotė aplinkoje. Vadovėlis: Technika, Vilnius, 2006, p. 292.
3. Morkūnas G. Radiacinė sauga ir radioaktyviųjų atliekų tvarkymo technologijos. Vilnius, 2007, p. 216.
4. Lawrence C., Akber R., Bollhofer A., Martin P. Radon-222 exhalation from open ground on and around and uranium mine in the wet-dry tropics. *Journal of Environmental Radioactivity* 10, 2009, p. 1–8.
5. Morkūnas G. Radono sąlygotos efektinės dozės individualiuose namuose įvertinimas. Daktaro disertacija. Vilnius, 2001, p. 94.
6. Jasaitis D., Girgždys A. Radono skilimo produktų tūrinių aktyvumų ore nuolatinių matavimų metodas. 10-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos "Mokslas - Lietuvos ateitis" medžiaga. Vilnius : Technika, 2007, p. 163-172.
7. Clavensjo B., Akerblom G., Morkūnas G. Radonas patalpose. Jo kiekio mažinimo būdai. Vilnius, 1999, p. 128.
8. Miles J. Detectors Uncertainties – Lecture notes for ERPET training course on Radon indoor risk and remedial actions: Stockholm, Sweden, September 1995.
9. Van der Spoel, W. H., van der Graaf, E. R. and de Meijer, R. J. Combined diffusive and advective transport of the radon in a homogeneous column of dry sand. *Health Physics*. Vol. 74, n. 1, 1988, p. 48–63.
10. Jiránek, M. Applicability of various insulating materials for radon barriers. *The Science of the Total Environment*. 272 (1-3), 2001, p. 79–84.
11. Mjones L. Gamma radiation in Swedish dwellings. *Radiat. Prot. Dosim.* V. 15, n. 2, 1992, p. 171–177.
12. Lietuvos higienos norma HN 85:2003 „Gamtinė apšvita. Radiacinės saugos standartai“ patvirtinimo“. *Valstybės žinios*, 2004, Nr. 30-997.
13. Miles, J. Origin of radon, transport, ingress – Lecture notes for ERPET training course on Radon indoor risk and remedial actions, Stockholm, Sweden, September, 1995.
14. Richard C., Cothorn, Rebers Paul A. Radon, radium, and uranium in drinking water. CRC Press: ISBN 0873712072, 9780873712071, 1990.
15. International Commission on Radiological Protection, ICRP publication 65. Protection against radon-222 at home and at work. V. 23, n.2, 1993, p. 45.

16. Radiacinės saugos centras. – Tekstas liet., angl., k., <<http://www.rsc.lt>> (2002 05 18).
17. Rad Elec Inc 1991. E-PERM system manual. Rad Elec Inc. Frederick. USA 39.
18. Volker G., „ALPHAGUARD PQ2000/MC50. Multiparameter radon Monitor. Characterization of its physical properties under normal and severe environmental conditions. Genitron Instruments GmbH. Frankfurt am Main. Germany, 1999, p. 53.
19. MARKUS-10. The instrument for determining the radon content in the soil. User's guide, 1996.
20. Gilmore G., Hemingway J. Practical gamma-ray spectrometry. England, 2003, p. 314.
21. Debertin K., Helmer R. G. Gamma and X-Ray spectrometry with Semiconductor Detectors. Amsterdam, 1988.
22. Jorma S. Methods for determination of radon-222 in water by liquid scintillation counting. Swedish Radiation Protection Institute. 1993, p. 7.
23. Sources and effects of ionizing radiation, United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic radiation. UNSCEAR