

## PRIEMAIŠOS NAUDOTUOSE PLUTONIO ŠALTINIuose IR GAMA SPINDULIUOTĖ

Inga Pelanytė<sup>1</sup>, Stasys Motiejūnas<sup>2</sup>, Arūnas Gudelis<sup>3</sup>

Vilniaus Gedimino technikos universitetas,

El. paštas: <sup>1</sup>Inga.Pelanyte@apst.vgtu.lt; <sup>2</sup>s.motiejunas@rata.lt; <sup>3</sup>gudelis@ktl.mii.lt

**Anotacija.** Šiame darbe nagrinėjama naudotų plutonio šaltinių izotopinė sudėtis ir galimų priemaišinių radionuklidų įtaka žmonių saugai. Pateikti radionuklidų americio <sup>241</sup>Am ir plutonio <sup>241</sup>Pu aktyvumo dūmų jutikliuose skaičiavimo rezultatai. Gautos vertės kinta nuo 0,934±0,028 MBq iki 91,2±4,6 MBq. Išmatuota gama spinduliuotės sukelta lygiavertės dozės galia. Nustatytos lygiavertės dozės galios vertės kinta nuo 220 nSv/h iki 500 nSv/h. Vidutinė dozės galia patalpoje yra apie 140 nSv/h. Įvertinta išorinė apšvita, sukelta dirbtinės kilmės americio <sup>241</sup>Am radionuklidų, esančių naudotuose dūmų jutikliuose. Nustatyta, kad metinė išorinė apšvita žmogui, dirbančiam patalpoje, kurioje įmontuotas dūmų jutiklis, kinta nuo 0,06 mSv iki 0,31 mSv.

**Reikšminiai žodžiai:** dūmų jutikliai, gama spektrometriniai tyrimai, aktyvumas, išorinė gama apšvita.

### Įvadas

Dirbant su jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniais, susidaro radioaktyviųjų atliekų. Lietuvoje daugiausia jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinių naudoja Ignalinos atominė elektrinė (AE), stambūs pramonės objektai ir medicinos įstaigos.

Nuo 1989 m. Ignalinos AE saugyklose sukaupta apie 15 400 naudotų plutonio šaltinių, o Lietuvos įmonės tebeturi per 22 tūkst. šaltinių, iš jų 99 % – dūmų jutikliai RID (Mokrik *et al.* 2008). Kiekviename RID, kaip nurodyta techniniame pase, yra du šaltiniai su radioaktyviuoju plutonio izotopu <sup>239</sup>Pu.

<sup>239</sup>Pu radionuklidams būdinga tai, kad branduolių virsmo metu spinduliuojamas alfa dalelės. Jas visiškai sugeria oro sluoksnis arba paviršinis odos sluoksnis, todėl šio radionuklido šaltiniai nelemia papildomos išorinės apšvitos. Tačiau šaltiniuose esantys kiti radionuklidai, laikui bėgant ir senstant šaltiniams, gali būti svarbūs tiek žmonių saugos, tiek šių šaltinių laidojimo saugos požiūriais.

Šio darbo tikslas – patikrinti, ar naudotų plutonio šaltinių izotopinė sudėtis atitinka šaltinių pasuose deklaruojamą sudėtį ir įvertinti galimų priemaišinių radionuklidų įtaką žmonių saugai.

### Plutonio savybės ir jo naudojimas

Plutonis yra transuraninis radioaktyvusis elementas, kurio eilės numeris periodinėje elemento sistemoje – 94.

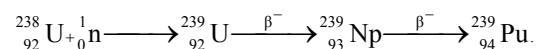
1940 m. Kalifornijoje Berklio laboratorijoje Glenas Teodoras Siborgas (Glenn Theodore Seaborg) ir Edvinas

Matisonas Mak Milanas (Edwin Mattison McMillan) pirmą kartą susintetino plutonį.

Atrasta ir apibūdinta dvidešimt skirtingų plutonio izotopų. Pats ilgaamžiškiausias yra <sup>244</sup>Pu, kurio pusėjimo trukmė ( $T_{1/2}$ ) siekia 80,8 mln. m. Svarbiausi plutonio izotopai yra šie (Nuclear Energy... 2008): <sup>238</sup>Pu ( $T_{1/2}$  = 87,74 m.;  $\alpha$  skilimas); <sup>239</sup>Pu ( $T_{1/2}$  = 24100 m.;  $\alpha$  skilimas); <sup>240</sup>Pu ( $T_{1/2}$  = 6560 m.;  $\alpha$  skilimas); <sup>241</sup>Pu ( $T_{1/2}$  = 14,35 m.;  $\beta$  skilimas); <sup>242</sup>Pu ( $T_{1/2}$  = 376000 m.;  $\alpha$  skilimas).

<sup>239</sup>Pu dažniausiai pasitaikantis plutonio izotopas branduoliniuose reaktoriuose, kuris duoda daug tos pačios energijos kaip ir <sup>235</sup>U.

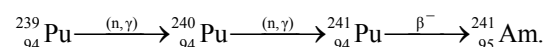
<sup>239</sup>Pu susidarymą iliustruoja lygtis:



Reakcija vyksta, kai urano radioizotopas <sup>238</sup>U pagau-na lėtąjį neutroną. Susidaro radioaktyvusis izotopas <sup>239</sup>U, kurio skilimo pusėjimo trukmė – 23,5 min. Šis urano izotopas yra  $\beta^-$  radioaktyvusis, todėl vyksta radioaktyvusis skilimas, kurio metu susidaro <sup>239</sup>Np (Butkus 2006). <sup>239</sup>Np pusėjimo trukmė – 2,3565 d. Neptūnio izotopas taip pat yra  $\beta^-$  radioaktyvusis ir vykstant skilimui susidaro <sup>239</sup>Pu.

<sup>239</sup>Pu radionuklidų kiekis gali būti panašus kaip <sup>226</sup>Ra, kartais didesnis. Abu šie radionuklidai turi skilimo produktų, kurių pusėjimo trukmė gali būti dar ilgesnė (Crossland 2006).

<sup>239</sup>Pu nuklidai, veikiami neutronų srauto, virsta <sup>240</sup>Pu, o šie – <sup>241</sup>Pu nuklidais. Šis plutonio izotopas yra  $\beta^-$  radioaktyvusis ir virsta <sup>241</sup>Am:



Lengvojo vandens reaktoriuose pasigaminančio plutonio įprastinė izotopinė sudėtis yra tokia: apie 53 %  $^{239}\text{Pu}$ , 24 %  $^{240}\text{Pu}$ , 15 %  $^{241}\text{Pu}$ , 6 %  $^{242}\text{Pu}$ , 2 %  $^{238}\text{Pu}$  (Nuclear Energy... 2008).

Plutonio skleidžiamos alfa dalelės neįveikia odos sluoksnio, tačiau jos gali paveikti vidinius organus. Plutonio radionuklidai į žmogaus organizmą gali patekti prarijus, per atviras žaizdas ir įkvėpus (Luciani, Polig 2000). Plutonio kiekis žmogaus organizme nustatomas tiriant iš organizmo šalinamas medžiagas.

1945 m. buvo pagamintos dvi atominės bombos. Viena iš plutonio bombų pirmą kartą panaudota eksperimentiniam sprogdinimui bandymų poligone. Kita tų pačių metų rugpjūčio mėn. numesta ant Nagasakio Japonijoje.

Plutonio naudojimo sritys:

- medžiaga branduolinėms bomboms;
- medžiaga branduoliniam kurui gaminti;
- energijos šaltiniuose (širdies stimulatoriuose, erdvėlaiviuose, pvz., Amerikoje plutonis buvo naudojamas kaip energijos šaltinis 24 kosminiuose aparatuose, kurie darė tolimųjų planetų nuotraukas);
- dūmų jutikliuose;
- statinio elektros krūvio neutralizatoriuose.

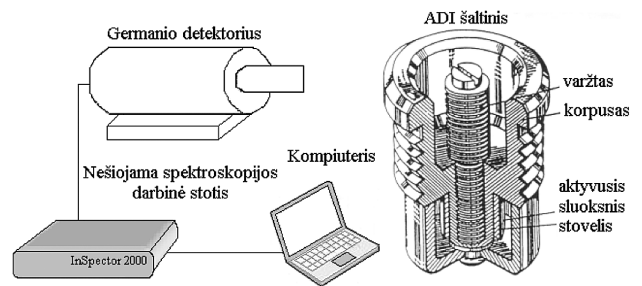
Americis pirmą kartą susintetintas 1944 m. Čikagoje Argono laboratorijoje. Americio izotopų atominė masė yra nuo 231 iki 249. Visi 13 susintetintų americio izotopų nestabilūs. Patys ilgaamžiškiausi americio izotopai yra  $^{243}\text{Am}$  ( $T_{1/2} = 7370$  m.),  $^{241}\text{Am}$  ( $T_{1/2} = 432,2$  m.) ir  $^{242}\text{Am}$  ( $T_{1/2} = 141$  m.) (Nakamura *et al.* 2007).

$^{241}\text{Am}$  yra  $^{241}\text{Pu}$  radionuklido skilimo produktas. Vykstant branduoliniam virsmui  $^{241}\text{Am}$  branduoliai virsta gerokai ilgaamžiškesnio neptūnio  $^{237}\text{Np}$  branduoliais. Jo pusėjimo trukmė – 2,14 mln. metų.

Kadangi  $^{241}\text{Am}$  yra ne toks pavojingas nei  $^{239}\text{Pu}$ , tai šiuolaikiniuose prietaisuose dažniau naudojamas  $^{241}\text{Am}$ . Šio šaltinio aktyvumas buitiniuose dūmų jutikliuose yra apie 1000 kartų mažesnis nei  $^{239}\text{Pu}$  šaltinių aktyvumas. Skirtingai negu plutonio radionuklidai,  $^{241}\text{Am}$  spinduliuoja ne tik  $\alpha$  daleles, bet ir nedidelės energijos gama spindulius. Pačios intensyviausios gama linijos yra šių energijų – 14 ir 59,5 keV (Unger, Trubey 1982).

### Tyrimo objektas ir metodika

Tirti parinkti dūmų jutikliai, naudojami patalpų priešgaisrinėje signalizacijoje. Buvo tirti KI-1 prietaisų su ABI-KI šaltiniai, kurių aktyvumas – 37,0 MBq (1 pav.).



1 pav. Gama spektrometrinė sistema ir ADI šaltinis su Pu izotopais

Fig. 1. Gama spectrometric system ADI derivation with Pu isotope

Šie prietaisai buvo pagaminti 1970–1980 m. Tikslu data nėra žinoma, nes šaltiniai neturi jokių žymų.

Tyrimė naudota įranga pateikta 1 pav. Matavimai atlikti panaudojus spektrometrą (Canberra, JAV) su gryno germanio detektoriumi (HPGe). Detektoriaus vakuuminė sistema prijungta prie detektoriaus šaldymo strypo, termiškai sujungto su skystuoju azotu (Chadyšienė *et al.* 2004).

Gama spektrų tyrimai atlikti pagal aplinkos apsaugos normatyviniame dokumente LAND 36-2000 pateiktą metodiką. Prietaisas buvo iš anksto paruoštas – tinkamai atšaldytas ir energišškai sukalibruotas. Speciali gama spektrų apdorojimo įranga leidžia identifikuoti radionuklidus. Matavimo trukmė turi būti tokia, kad gama smailėje būtų sukaupta ne mažiau kaip 1000 impulsų.

Eksperimento metu kiekvieno tiriamojo šaltinio gama spektro kaupimo trukmė – 300 s, todėl spektrus nesunku tarpusavyje palyginti vizualiai. Tam, kad tiriamasis šaltinis būtų kuo artimesnis taškiniam šaltiniui, matavimo metu tiriamasis šaltinis buvo gana didelis – 0,5 m atstumu nuo gama spektrometro jutiklio. Kartu buvo išmatuotas ir žinomo aktyvumo taškinio kalibracinio  $^{241}\text{Am}$  spektras. Matavimai atlikti pagal 59,5 keV energijos gama smailę. Kitų bent kiek reikšmingesnių gama smailių nepastebėta. Aktyvumas mėginyje apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$A = \frac{S}{S_k} \cdot A_k, \quad (1)$$

čia:  $A$  – tiriamojo šaltinio (bandinio) aktyvumas, MBq;  $A_k$  – kalibracinio šaltinio aktyvumas, MBq;  $S$  – bandinio gama smailės plotas, imp.;  $S_k$  – kalibracinio šaltinio gama smailės plotas, imp.

$^{241}\text{Pu}$  radionuklido aktyvumas apskaičiuojamas taip:

$$A_1 = \frac{A_2(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_2(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}, \quad (2)$$

čia:  $A_2$  – americio izotopo  $^{241}\text{Am}$  aktyvumas, MBq;  $\lambda_1$  – plutonio izotopo  $^{241}\text{Pu}$  skilimo konstanta,  $\text{s}^{-1}$ ;  $\lambda_2$  – americio izotopo  $^{241}\text{Am}$  skilimo konstanta,  $\text{s}^{-1}$ ;  $t$  – laikas, prabėgęs nuo izotopų atskyrimo (šaltinio pagaminimo), s.

$^{241}\text{Am}$  aktyvumo kitimas laikui bėgant apskaičiuojamas pagal formulę:

$$A_2(t) = A_{01} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + A_{02} e^{-\lambda_2 t}, \quad (3)$$

čia:  $A_{02}$  – americio izotopo  $^{241}\text{Am}$  aktyvumas laiko momentu  $t = 0$ , MBq;  $A_{01}$  – plutonio izotopo  $^{241}\text{Pu}$  aktyvumas laiko momentu  $t = 0$ , MBq.

Žinomo aktyvumo jonizuojančiosios spinduliuotės nulemtą dozę  $H$  atstumu  $d$  (m) nuo šaltinio galima apskaičiuoti pagal formulę

$$H = T \cdot \frac{\Gamma \cdot A}{d^2}, \quad (4)$$

čia:  $H$  – dozė atstumu  $d$  nuo šaltinio, mSv;  $\Gamma$  – gama konstanta 1 m atstumu nuo šaltinio,  $\Gamma = 8,48 \cdot 10^{-5}$  ( $\text{mSv} \cdot \text{m}^2$ )/( $\text{h} \cdot \text{MBq}$ ) (Unger, Trubey 1982);  $T$  – laikas, h.

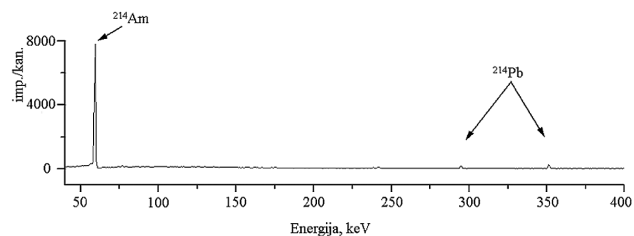
Išorinė dozės galia 0,1 m atstumu nuo šaltinio matuota ESM FH 40 G-L dozimetru, kurio matavimo diapazonas – 10 nSv/h iki 100 mSv/h. Nuolat matuojama, vienoje vietoje atliekant ne mažiau kaip 10 matavimų. Galutinis matavimo rezultatas nustatomas apskaičiuavus matavimo rezultatų vidurkį. Matavimo paklaida  $\pm 10\%$ .

### Darbo rezultatai ir jų aptarimas

Kaip jau minėta, buvo ištirti penki šaltiniai. Be to, papildomai buvo ištirta ekrano, sulaikančio alfa daleles, įtaka gama spektrui – vieno šaltinio gama spektras buvo išmatuotas pakėlus šį ekraną, o paskui nuleidus. Kadangi rezultatai skyrėsi labai mažai (mažiau nei 2%), tai kitų šaltinių spektrai buvo matuojami nepakėlus minėtų ekranų. Tačiau į gama kvantų sugertį ekranuose buvo atsižvelgta darant atitinkamą pataisą.

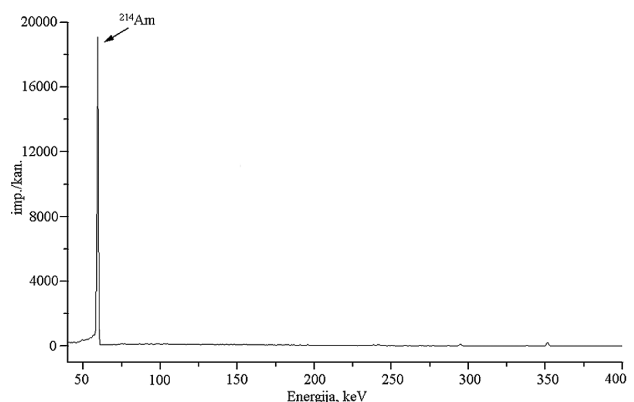
Visų tiriamų šaltinių gama spektruose identifikuota labai ryški – apie 60 keV – energijos gama smailė (2, 3 pav.). Ši smailė tiksliai atitinka americio  $^{241}\text{Am}$  gama kvantų energiją ir yra priskirtina šiam nuklidui. Kitų

bent kiek reikšmingesnių gama smailių nepastebėta. Iš 3 pav. akivaizdžiai matyti, kad 2-ojo šaltinio  $^{241}\text{Am}$  spinduliuotės intensyvumas didesnis negu kituose tirtuose šaltiniuose. Matavimų duomenys apibendrinti 1 lentelėje.



2 pav. Plutonio šaltinio (su pašalintu ekranu) gama spektras

Fig. 2. Gama spectrum of Plutonium derivation (with outside screen)



3 pav. Mėginio Nr. 2 gama spektras

Fig. 3. Gama spectrum of sample

Nustatyta, kad daugiausia americio radionuklido  $^{241}\text{Am}$  yra 2-ame mėginyje, kurio aktyvumas siekia  $2,250 \pm 0,068$  MBq. Papildomai buvo matuota gama dozės galia, 0,1 m atstumu nuo šaltinio. Kaip rodo atlikti eksperimentiniai tyrimai, didžiausia išorinės lygiavertės dozės galia buvo 2-ame mėginyje – apie 500 nSv/h, o 1-o – tik 220 nSv/h. Kitų šaltinių dozės galia svyravo apie 450 nSv/h. Vidutinė dozės galia patalpoje yra apie 140 nSv/h.

Reikia pažymėti, kad gama dozės galios matavimai yra nelabai patikimi, nes matavimo prietaisas nėra skirtas registruoti tokios mažos energijos (14 ir 60 keV) gama kvantus. Todėl šiuos gama dozės galios matavimus galima laikyti tik orientaciniais.

Pradinis plutonio radionuklido  $^{241}\text{Pu}$  aktyvumas buvo įvertintas taikant (2) formulę. Kadangi tiksli šaltinių pagaminimo data nėra žinoma, skaičiavimai buvo pakartoti laikant, kad šaltinių amžius – 30 ir 40 metų. Skaičiavimų rezultatai pateikti 1 lentelėje. Plutonio  $^{241}\text{Pu}$  aktyvumas tiriamuose šaltiniuose kito nuo  $37,9 \pm 1,9$  MBq

2 lentelė. <sup>241</sup>Am jonizuojančiosios spinduliuotės nulemtos metinės dozės

Table 1. Results of gamma spectrometric measurement and estimated activities of <sup>241</sup>Am and <sup>241</sup>Pu

Mėginys	Smailės plotas, imp.	<sup>241</sup> Am aktyvumas, MBq	Pradinis <sup>241</sup> Pu aktyvumas (T = 30 m.), MBq	Pradinis <sup>241</sup> Pu aktyvumas (T = 40 m.), MBq
1	12991±123	0,934±0,028	37,9±1,9	34,3±1,9
2	31298±188	2,250±0,068	91,2±4,6	82,6±4,6
3	27514±176	1,978±0,059	80,2±4,0	72,6±4,0
4	17957±145	1,291±0,039	52,3±2,6	47,4±2,6
5	21305±158	1,532±0,046	62,1±3,1	56,3±3,1
Kalibracinis	3299±68	0,233±0,007	–	–

iki 91,2±4,6 MBq (darant prielaidą, kad nuo šaltinių pagaminimo prabėgo 30 m.). Nustatytas vidutinis plutonio <sup>241</sup>Pu aktyvumas dūmų jutikliuose yra 64,7±3,2 MBq.

Būtina pabrėžti, kad tirtųjų šaltinių radioizotopinė sudėtis ir aktyvumai akivaizdžiai neatitinka verčių, gamintojo deklaruotų šaltinių pasuose. Juose nurodyta, kad šaltiniuose esančio plutonio <sup>239</sup>Pu aktyvumas neviršija 37 MBq. Kitų plutonio izotopų, jeigu tokių būtų, aktyvumai nenurodyti. Iš 1 lentelėje pateiktų rezultatų matoma, kad kai kuriuose šaltiniuose pradinis plutonio <sup>241</sup>Pu aktyvumas šią vertę viršijo daugiau nei du kartus. Iš to galima daryti labai svarbias išvadas:

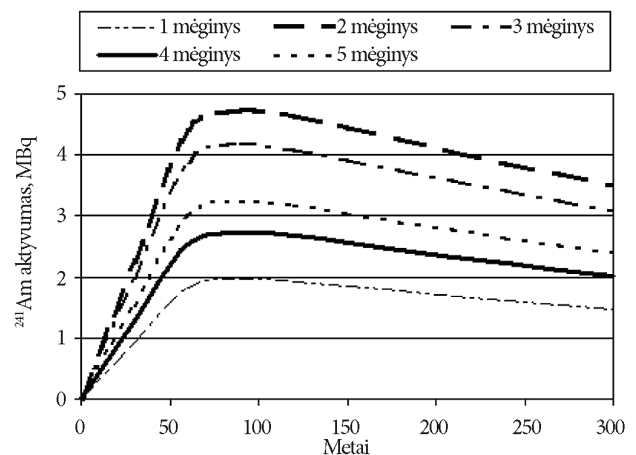
1) Sovietų Sąjungoje plutonio šaltiniams gaminti buvo naudojamas plutonio izotopų mišinys, kuriame plutonis <sup>239</sup>Pu galėjo sudaryti gana nedidelę dalį.

2) Plutonis buvo dozuojamas labai netiksliai ir šaltiniai buvo kur kas didesnio aktyvumo.

Tačiau minėtoms išvadoms patvirtinti būtini daug išsamesni tyrimai.

Pagal (3) formulę buvo įvertinta americio <sup>241</sup>Am aktyvumo kaita laikui bėgant. Šiems vertinimams buvo pasirinktas 30 m. šaltinių amžius – konservatyvesnis atvejis, atitinkantis didesnes plutonio <sup>241</sup>Pu aktyvumo ir americio <sup>241</sup>Am maksimalaus aktyvumo vertes. Kaip matyti iš 4 pav., dirbtinis radionuklidai americio <sup>241</sup>Am visuose tirtuose šaltiniuose pasiekia didžiausią savo aktyvumą po maždaug 80 metų. Paskui americio radionuklido aktyvumas pradeda mažėti.

Apskaičiuotos americio <sup>241</sup>Am aktyvumo vertės buvo naudotos skaičiuojant žmonių, dirbančių sėdimąjį darbą kambariame, kuriame įrengta gaisrinė signalizacija, išorines dozes (2 lentelė). Buvo taikoma (4) formulė. Kadangi 1,2 m aukštyje virš grindų būna patalpose esančio žmogaus kūno dalis, pasižyminti didžiausiu jautriu apšvitai (Butkus *et al.* 2005), tai atstumas iki šaltinio parinktas lygus 1,5 m.



4 pav. <sup>241</sup>Am aktyvumo kitimas laikui bėgant (prielaida, kad šaltiniai pagaminti prieš 30 metų)

Fig. 4. Reduction of <sup>241</sup>Am activity (Premise, that derivate are made before 30 year)

Įvertinus apšvitą, kurią gali lemti americio <sup>241</sup>Am radionuklidai, nustatyta, kad didžiausia apšvita, kurią gautų žmonės, dirbdami patalpoje su įrengta priešgaisrine signalizacija, kasmet po 1760 val. būtų lygi 0,31±0,02 mSv. Tai neviršija metinės dozės – 1 mSv.

## Išvados

1. Visuose tirtuose šaltiniuose aptikta reikšminga plutonio <sup>241</sup>Pu ir jo skilimo produkto americio <sup>241</sup>Am priemaiša, todėl galima teigti, kad šaltiniai, žymimi <sup>239</sup>Pu, buvo gaminami ne iš gryno plutonio, bet iš neutronų srautu apšvitinto branduolinio kuro arba iš atliekinio plutonio, pasilikusio išskyrus branduoliniam ginklui tinkamą <sup>239</sup>Pu.

2. Kaip rodo atlikti eksperimentiniai tyrimai, vidutinė išorinės lygiavertės dozės galia dėl tiriamų šaltinių įtakos yra apie 410 nSv/h, t. y. tris kartus didesnė nei išmatuota vidutinė lygiavertės dozės galia patalpoje.

3. Nustatyta, kad šalia daugiausia americio <sup>241</sup>Am radionuklidų turinčio 2-o šaltinio dirbantis darbuotojas,

**2 lentelė.** <sup>241</sup>Am jonizuojančiosios spinduliuotės nulemtos metinės dozės

**Table 2.** <sup>241</sup>Am ionizeble radiation determine yearlong dose

Nr.	Dabartinis americio <sup>241</sup> Am aktyvumas, MBq	Dozė, dėl americio <sup>241</sup> Am jonizuojančiosios spinduliuotės, mSv	Didžiausias americio <sup>241</sup> Am aktyvumas, MBq	Didžiausia dozė, dėl americio <sup>241</sup> Am jonizuojančiosios spinduliuotės, mSv
1	0,934±0,028	0,060±0,002	1,968±0,118	0,13±0,01
2	2,250±0,068	0,150±0,004	4,741±0,284	0,31±0,02
3	1,978±0,059	0,130±0,004	4,168±0,250	0,28±0,02
4	1,291±0,039	0,090±0,003	2,721±0,163	0,18±0,01
5	1,532±0,046	0,100±0,003	3,228±0,194	0,21±0,01

veikiamas šios spinduliuotės, kasmet patirtų apie 0,15 mSv išorinę dozę. Senstant šaltiniui ši dozė didėja ir gali sudaryti iki 1/3 ribinės dozės vertės.

**Rekomendacija**

Kadangi visi tirtieji naudoti plutonio šaltiniai skleidžia gama spinduliuotę, didelės skiriamosios gebos gama spektroskopija leistų aptikti ir identifikuoti šiuos šaltinius įvairių radioaktyviųjų atliekų mišinyje.

**Padėka**

Darbo autoriai reiškia nuoširdžią padėką Radioaktyviųjų atliekų tvarkymo agentūros darbuotojui Baliui Morkvėnui už pagalbą atliekant šaltinių aktyvumo matavimus.

**Literatūra**

Butkus, D. 2006. *Jonizuojančioji spinduliuotė aplinkoje*. Vilnius: Technika. 292 p.

Butkus, D.; Pilkytė, L.; Morkūnas, G. 2005. Modeling of doses indoors due to construction materials, in *Proc. of 6th International Conference „Environmental engineering“*. Vilnius: Technika, 58–62.

Chadyšienė, R.; Pečiulienė, M.; Girgždys, A. 2004. Jonizuojančiosios spinduliuotės pokyčiai urbanizuotoje teritorijoje, *Journal of Environment Engineering and Landscape Management* 7(2): 37–41.

Crossland, I. G. 2006. Small diameter borehole disposal of disused sealed sources. Safety of radioactive waste disposal, in *Proc. of an International Conference Tokio, October 3–7, 2005*. Vienna: IAEA, 321–330.

Luciani, A.; Polig, E. 2000. Verification and modification of the

ICRP-67 model for plutonium dose calculation, *Health Physics* 78(3): 303–310.

doi:10.1097/00004032-200003000-00008

Mokrik, R.; Mažeika, J.; Michelevičius, D. 2008. *Ignalinos atominėje elektrinėje saugomų uždarytų jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinių ir ilgąamžių radioaktyviųjų atliekų laidojimo vidutinio gylio gręžiniuose (BOSS) metodo galimybių studija*. Vilnius. 39 p.

Nakamura, S., et al. 2007. Thermal-neutron capture cross section and resonance integral of americium-241, *Journal of Nuclear Science and Technology* 44(12): 1500–1508.

doi:10.3327/jnst.44.1500

Nuclear Energy Agency [online]. 2008. *Plutonium*: [cited 8 January 2009]. Available from Internet:

<http://www.world-nuclear.org/info/inf1-5.html>.

Unger, L. M.; Trubey, D. K. 1982. *Specific gamma-ray dose constants for nuclides import to dosimetry and radiological assessment*. ORNL/R5IC-45/R1. 83 p.

**ADMIXTURES IN SPENT PLUTONIUM SOURCES AND GAMMA-RADIATION**

**I. Pelanytė, S. Motiejūnas, A. Gudelis**

Summary

The isotopic composition of several spent smoke detectors containing plutonium has been investigated. The article also presents the calculated results of <sup>241</sup>Am and <sup>241</sup>Pu activities in smoke detectors. The received values vary from (0.934±0.028) MBq to (91.2±4.6) MBq. The equivalent dose rate of the established gamma radiation vary from 220 nSv/h to 500 nSv/h. A dose caused by artificial radionuclides in spent smoke detectors was evaluated and compared in the article. It has been found out that due to smoke detectors, an annual dose varies from 0.06 mSv to 0.31 mSv.

**Keywords:** smoke detectors, gama spectrometric research, activity, external gama irradiance.