

VILNIAUS UNIVERSITETAS

FIZIKOS INSTITUTAS

Andrej Rožkov

**DIRBTINIAI RADIONUKLIDAI IR JŲ SAŲEIKAI SU
AEROZOLIO DALELĖMIS IGNALINOS AE IR JOS APLINKOJE**

Daktaro disertacija

Fiziniai mokslai, fizika (02 P)

Vilnius, 2009

Disertacija parengta 2004-2008 metais Fizikos instituto Branduolinių ir aplinkos radioaktyvumo tyrimų laboratorijoje.

Mokslinis vadovas: dr. Rimvydas Jasiulionis (Fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika - 02 P)

Konsultantas: prof. dr. Vidmantas Remeikis (Fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika - 02 P)

TURINYS

| | |
|--|----|
| Įvadas | 5 |
| Ginamieji teiginiai | 9 |
| Naujumas | 9 |
| Publikacijos..... | 10 |
| Pranešimai konferencijose | 11 |
| Doktoranto atlikto eksperimentinio darbo indėlis | 13 |
| Padėka | 13 |
| Literatūros apžvalga..... | 14 |
| 1. Dirbtiniai radionuklidai pažemio ore..... | 14 |
| 1.1 Radionuklidai aplinkoje po branduolinio ginklo bandymų atmosferoje | 16 |
| 1.2 ¹³⁷ Cs patekimas į aplinką po avarijos Černobylio AE | 19 |
| 1.3 Šiuolaikiniai ¹³⁷ Cs šaltiniai aplinkoje | 24 |
| 1.4 ¹³⁷ Cs antrinis pakėlimas į orą nuo dirvožemio paviršiaus | 25 |
| 1.5 Gaisrai ir medienos deginimas – ¹³⁷ Cs emisijos į pažemio orą šaltiniai..... | 27 |
| 1.6 Dirbtinių radionuklidų išlėkos į atmosferą iš Ignalinos AE | 29 |
| 1.7 ¹³⁷ Cs aktyvumo koncentracijų ore eigos analizė | 34 |
| 2. Tirpios aerozolio dalelės atmosferoje..... | 37 |
| 2.1 Aerozolio dalelių, radionuklidų nešėjų, tirpumas plaučių skystyje..... | 38 |
| Metodika | 41 |
| 3.1 Pažemio oro aerozolio dalelių bandinių ėmimas | 43 |
| 3.2 Radionuklidų aktyvumo koncentracijos ore pasiskirstymo skaičiavimas | 51 |
| 3.3 Iškritų bandinių rinkimas..... | 53 |
| 3.4 Aerozolio dalelių, radionuklidų nešėjų, išplovimo vandeniū metodika | 57 |
| 3.4.1 Aerozolio dalelių, radionuklidų nešėjų, bandinių išplovimo vandeniū eksperimentams atlikti paėmimas..... | 65 |
| Rezultatai | 70 |
| 4.1 Radionuklidų aktyvumo koncentracijos pažemio ore Ignalinos AE aplinkoje . | 70 |
| 4.2 ¹³⁷ Cs aktyvumo koncentracijų pažemio ore eiga Ignalinos AE regione 1978-2008 metais..... | 82 |
| 4.3 ¹³⁷ Cs aktyvumo koncentracijų ore padidėjimų analizė..... | 85 |
| 4.4 Radionuklidų aktyvumo koncentracijos iškritose..... | 89 |

| | |
|---|-----|
| 4.5 Trumpaamžių radionuklidų aktyvumo koncentracijos Ignalinos AE ventiliacinėje sistemoje..... | 92 |
| Skyriaus išvados | 94 |
| 5. Surinktų filtrais aerozolio dalelių išplovimas..... | 95 |
| 5.1 Pažemio ore surinktų filtrais aerozolio dalelių išplovimas..... | 95 |
| 5.2 IAE ventiliaciniame ore surinktų filtrais aerozolio dalelių išplovimas | 98 |
| 5.3 Tirpių ir netirpių aerozolio dalelių pernešimas pažemio ore | 103 |
| Skyriaus išvados | 107 |
| Darbo rezultatai | 108 |
| 1 priedas. ¹³⁷ Cs aktyvumo koncentracijų ore padidėjimų Ignalinos AE regione 2005- 2006 metais analizė..... | 109 |
| Literatūra | 119 |

IVADAS

Branduolinės energetikos saugumo, radionuklidų patekimo į aplinką problemos yra aktualios visose branduolinės energetikos ciklo grandyse ir visose atominių elektrinių paleidimo, darbo ir eksploatacijos nutraukimo stadijose [1].

Atominių elektrinių (AE) darbo metu susidariusių radionuklidų dalis per aukštuminius kaminus su ventiliaciniu oru išmetama į aplinką ir išsisklaido pažemio ore.

Gamtoje susidarantys radionuklidai, nuo pat jonizuojančių spindulių registracijos pradžios, tapo visapusiškų tyrimų objektu. Šių tyrimų pagrindu susiformavo naujos mokslo sritys – branduolinė meteorologija [2] ir platesnės apimties branduolinė geofizika [3]. Branduolinės meteorologijos objektas yra radionuklidų šaltinių ir radionuklidų nuotėkių atmosferoje, jų pasiskirstymo erdvėje ir laike dėsningumą nagrinėjimas. Radionuklidai yra naudojami, kaip oro masių judėjimo žymekliai, tyrinėjant atmosferoje vykstančius fizikinius ir cheminius procesus, kai neįmanoma taikyti kitų tyrimo būdų.

Žinoma, kad ore pasigaminę radionuklidai, skylant emanaciniams radionuklidams arba susidarant kosminių spindulių branduolinėse reakcijose, labai greitai prisijungia prie žymiai didesnio kiekio ore esančių aerozolio dalelių, ir tolimesnę radionuklidų elgseną jau lemia aerozolių dalelių elgseną aprašantys dėsningumai. Aerozolio prigimtis, jo susidarymas, augimas, atmosferos išsivalymas iki šiol yra daugelio tyrimų objektas [4-6].

Atmosferinis aerozolis – sudėtingų cheminių, fizikinių ir biologinių procesų aplinkoje darinys [7, 8]. Gamtoje aerozolio dalelės sutinkamos Aitkeno branduolių kondensacinėje (iki 0,1 μm dydžio), akumuliacinėje (0,1 – 1,0 μm) ir dispersinėje (virš 1,0 μm) modose. Stratosferoje atmosferinio aerozolio dalelių yra mažai (1-3 cm^{-3}). Troposferoje gamtinio aerozolio dalelių nepalyginamai daugiau (10^3 cm^{-3}); ore santykinai pagal kiekį daugiausia Aitkeno branduolių, pagal gyvavimo laiką – akumuliacinių aerozolio dalelių, o pagal masę – dispersinių aerozolio dalelių [9].

Aerozolio dalelės gali susidaryti iš dirvožemio dulkių, suodžių ar juodosios anglies, jūros druskų iš vandens bangų mūšos, pramonės dūmų per kaminus, automobilių išmetamų degimo produktų, sulfatų iš vulkanų išsiveržimų, fitoplanktono ar sieros oksido ir organinės medžiagos antrinės oksidacijos. Medžiaga aerozolio dalelių augimui gali būti ne tik priemaišos ore, bet ir dujos bei vandens garai.

Sulfatai, jūros druskos ir cheminių elementų (kartais su radioaktyviais branduoliais) jonai lengvai absorbuoja vandens molekules. Pastarosios dėl savo elektrinio krūvio dipoliškumo aerozolio dalelėje sukuria stabilią struktūrą su stipriomis paviršinio įtempimo jėgomis. Apie 0,1 μm skersmens dalelės yra ir debesų kondensacijos centrai. Palankiomis debesų formavimuisi sąlygomis šios dalelės išauga iki 2 mm ir daugiau iki lietaus lašų dydžio. Pastaraisiais metais [10] stebimas tirpių aerozolio dalelių susidarymas atmosferoje dalelių augimo epizoduose, esant prisotintų vandens garų slėgiui. Vandenyje tirpios dalelės, tikriausiai, auga vandens molekulių sąskaita, kai atmosferoje yra prisotinti vandens garai.

Debesų kondensacijos centrų virtimas krušos elementais buvo tiriamas naudojant radionuklidus, kaip žymeklius, įvedant juos į kamuolinius debesis ir registruojant jų spinduliavimą lietaus lašuose ir kritulių vandenyje [11].

Technogeninių radionuklidų ir aerozolio dalelių sąveikos procesus lėmė jų patekimo į atmosferą būdas. Vykdamas branduolinio ginklo bandymus atmosferoje, urano ir plutonio dalijimosi produktai susidarydavo nedideliame tūryje, kuriame slėgis ir temperatūra pasiekdavo tokius dydžius, kuriems esant visos arti esančios medžiagos virsdavo dujomis. Įkaitusių dujų kamuolys išnešdavo radionuklidus virš troposferos. Vėstančiame dujų stulpe vykdavo aerozolio dalelių, turinčių dalijimosi produktų, susidarymas ir vėliau jų pasiskirstymas troposferoje ir stratosferoje. Tokiame dujų mišinyje vyko radionuklidų frakcionavimas ir kondensacinių dalelių susidarymas. Žemiau tropopauzės pasilikę ir prisijungę prie didesnių dalelių radionuklidai, iškrisdavo artimajame debesies pėdsake, o prie smulkių dalelių prisijungę radionuklidai pasiskirstydavo troposferoje, apskriedavo Žemės rutulį ir per keletą mėnesių būdavo išplaunami krituliais. Po eilės bandymų serijų stratosferoje susidarė dalijimosi produktų rezervuaras, kuriame radionuklidų buvimo trukmė siekė apie 1-2 metus. Nutraukus branduolinio ginklo bandymus atmosferoje, dalijimosi produktų aktyvumo koncentracijos ore ir žemės paviršiuje mažėjo. Pradėjo ryškėti iki tol mažai tyrinėti radionuklidų antrinio pakėlimo nuo žemės paviršiaus į orą ir nusėdimo dinaminiai procesai. Po tuomet įvykdytų branduolinio ginklo bandymų iki šiol pasaulio radioekologinio monitoringo stotyse registruojami ilgaamžiai radionuklidai [12].

Saviti radionuklidų sukibimo su aerozolio dalelėmis procesai buvo stebimi radionuklidams patekus į atmosferą po Černobylio atominės elektrinės (AE) avarijos.

Kelių tūkstančių laipsnių temperatūros sąlygojo lakių radionuklidų perėjimą į dujinę fazę ir pernašą kartu su į viršų kylančiomis oro masėmis į aukštesnius atmosferos sluoksnius, siekiančius kelių kilometrų aukštį. Vėstant dujoms, analogiškai kaip ir po branduolinių sprogių atmosferoje, vyko „karštų“ dalelių susidarymas dėl dalijimosi produktų kondensacijos ir frakcionavimo ant aerozolio dalelių. Avarijos sugriautas reaktorius ilgam laikui tapo technogeninių radionuklidų patekimo į aplinką šaltiniu. Antrinis dulkių pakėlimas nuo žemės paviršiaus, miškų gaisrai ir antropogeninė veikla po avarijos Černobylio AE užterštose teritorijose nuolat papildė ilgaamžių radionuklidų kiekį pažemio ore [13].

Globalus technogeninių radionuklidų patekimo į aplinką šaltinis yra pasaulio atominių elektrinių darbo metu susidariusių radionuklidų nuolatinės išlėkos į atmosferą. Atominės elektrinės į pažemio orą per aukštuminius kaminus po kelių pakopų filtracijos daugiausia išmeta inertinių dujų ir lakius radionuklidus. Skirtingos radionuklidų ir aerozolio dalelių sąveikai sąlygos susidaro energetiniuose reaktoriuose, turinčiuose dviejų arba vieno kontūro aušinimo sistemas. Kaip taisyklė išmetamo per aukštuminius kaminus oro ir aerozolio dalelių mišinio temperatūra yra neaukšta ir kelių kilometrų atstume nuo elektrinės stebimas ventiliacinio oro praskiedimas iki 1 milijono kartų.

Lietuvoje dirbtinius radionuklidus gamina Ignalinos atominė elektrinė. 1983 metais buvo pradėtas eksploatuoti Ignalinos AE 1500 MW RBMK reaktorius, o 1987 metais buvo paleistas antras reaktorius. Energijos gamyba pirmo bloko reaktoriuje buvo nutraukta 2005 metais, o antro bloko reaktorių planuojama sustabdyti 2009 metų pabaigoje.

RBMK reaktorius turi vieno kontūro su atšaka perkaitintam garui aušinimo sistemą. Radionuklidai, susidarę branduolinio kuro tabletėse atominės elektrinės RBMK reaktoriaus aktyviojoje zonoje, patenka į šilumnešį. Būgnuose separatoriuose vandens ir garo ribą įveikia tiksliai dujiniai radionuklidai ir dalis lakių ir vandenyje tirpių radionuklidų junginių. Kartu su vandens garu radionuklidai pasiekia turbiną ir dalyvauja garo kondensacijos procese. Ventiliaciniame kamine radionuklidai randami aerozolio dalelių sudėtyje. Visame kelyje nuo radionuklidų susidarymo iki pažemio oro aerozolio dalelių ir radionuklidų sąveikos sąlygos (temperatūra, vandens garų slėgis, cheminė sudėtis) keičiasi gana plačiose ribose. Aerozolio dalelių, radionuklidų

nešėjų, mišinys su kintančiu laike ir erdvėje tirpių ir netirpių aerozolio dalelių santykiu pasiskirsto AE faze.

Nuo 1978 metų Ignalinos AE poveikio zonoje Fizikos instituto geofizinėje stotyje (FI stotis) esančioje 3,5 km atstumu nuo Ignalinos AE, nepertraukiamai vykdomi radionuklidų aktyvumo koncentracijų matavimai pažemio ore ir iškritose, FI stočiai atsidūrus IAE pavėjinėje pusėje, registruojami dirbtiniai AE pagaminti radionuklidai [14-16].

Klasikiniai radionuklidų aktyvumo matavimai aerozolio dalelių, surinktų ant filtrų bandiniuose, verti papildymo radionuklidų pasiskirstymo tirpioje ir netirpioje aerozolio dalelių, surinktų ant filtrų, frakcijose ir dirbtinių radionuklidų sąveikos su aerozolio dalelėmis Ignalinos AE ventiliacinėje sistemoje tyrimais.

Šiuo metu radiacines saugos moksle kuriami inhaliuotų radionuklidų nešėjų nusėdimo kvėpavimo takuose modeliai, kuriuose skaičiuojami radionuklidų perėjimo iš aerozolio dalelių, įkvėptų su oru į plaučių skystį, koeficientai skirtingi tirpių ir netirpių aerozolio dalelių frakcijoms [17].

Darbo tyrimo objektas yra dirbtiniai radionuklidai ir jų sąveika su aerozolio dalelėmis sistemoje „Ignalinos AE – aplinka“.

Pagrindiniai šio disertacinio darbo **tiksai** buvo:

1. Nustatyti ^{137}Cs patekimo į Ignalinos AE aplinkos orą šaltinius ir įvertinti ilgą laiką ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų Ignalinos AE pažemio ore pokyčius.
2. Įvertinti dirbtinių radionuklidų pasiskirstymą tirpioje ir netirpioje aerozolio dalelių frakcijose sistemoje „Ignalinos AE – aplinka“.

Siekiant šio tikslo buvo suformuluoti tokie **uždaviniai**:

1. Nuolat matuoti radionuklidų aktyvumo koncentracijas pažemio ore ir atlikti eksperimentinių rezultatų statistinę analizę.
2. Įvertinti ^{137}Cs patekimą į Ignalinos AE aplinkos orą iš po avarijos Černobylio AE užterštų teritorijų.
3. Matuoti dirbtinių radionuklidų aktyvumo koncentracijas iškritose ir įvertinti jų srautus iš oro į žemės paviršių 2005-2008 metais.
4. Tirti aerozolio dalelių bandinių, surinktų pažemio ore ir Ignalinos AE ventiliacinės sistemos dujose, išplovimą ir matuoti radionuklidų aktyvumus bandiniuose iki ir po eksperimento.

5. Pasiūlyti skaičiavimo metodą įvertinti radionuklido pasiskirstymo tirpioje ir netirpioje aerozolio dalelių frakcijose kitimą AE fazele.

Aktualumas

Radionuklidų patekimas į aplinką yra aktuali problema visose branduolinės energetikos ciklo grandyse ir visose atominių elektrinių paleidimo, darbo ir eksploatacijos nutraukimo stadijose.

Atominių elektrinių poveikio aplinkai vertinimui yra svarbu patikimai registruoti atominės elektrinės pagamintų radionuklidų spinduliavimą aplinkoje ir įvertinti, radionuklidų nešėjų –aerozolio dalelių, savybes.

Ginamieji teiginiai

1. Metinės ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos pažemio ore pastaraisiais metais kinta su mažėjimo pusiau trukme, kuri artima ^{137}Cs skilimo pusamžiui.
2. Inertinių dujų radionuklidai, patekę į vieno kontūro atominės elektrinės aušinimo vandens garą, skildami virsta šarminių ir žemės šarminių metalų elementais, tampa kondensacijos branduoliais ir dėl vandens molekulių absorbcijos persotintuose vandens garuose auga radioaktyvios aerozolio dalelės.

Naujumas

Pirmą kartą eksponentine funkcija aprašyta metinių ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore kaita Ignalinos AE regione 1978-2008 metais ir įvertinta ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore mažėjimo pusiau trukmė. Pirmą kartą nustatytas tirpių aerozolio dalelių, radionuklidų nešėjų, augimas aušinimo vandens gare vieno kontūro atominės elektrinės kondensatoriuje.

Publikacijos

Tyrimų rezultatai paskelbti keturiuose mokslo publikacijose, įtrauktose į Mokslinės informacijos instituto (ISI) leidinių sąrašą, viename straipsnyje Lietuvos fizikos žurnale (žurnalas įtrauktas į ISI leidinių sąrašą nuo 2007 metų), dviejų konferencijų darbuose (proceedings) rubrikose *aplinkos fizika* (environmental physics) ir *branduolinė geofizika* (nuclear geophysics).

1. R. Jasiulionis, A. Rožkov and L. Vyčinas. Radionuclides in the ground-level air and deposition in the Ignalina NPP region during 2002-2005. **Lithuanian Journal of Physics** vol. 46 (1), 101-108 (2006).
2. R. Jasiulionis, A. Rožkov. Radionuclides in deposition in the Ignalina NPP region in 2005. **Central European Journal of Physics** vol. 4(4), 417-428 (2006).
3. R. Jasiulionis and A. Rožkov. ^{137}Cs activity concentration in the ground-level air in the Ignalina NPP region. **Lithuanian Journal of Physics** vol. 47 (2), 195-202 (2007).
4. R. Jasiulionis, A. Rožkov. The solubility of the aerosol, ^{137}Cs and ^{60}Co carrier, in the Ignalina Nuclear Power Plant region. **Applied Radiation and Isotopes** vol. 66 (12), 1992-1998 (2008).
5. R. Jasiulionis, L. Vyčinas, A. Rožkov. In situ study of the ^{41}Ar plume released from the Ignalina NPP. **Central European Journal of Physics** vol. 6 (4), 775-780 (2008).

Konferencijų medžiaga (proceedings):

6. R. Jasiulionis, A. Rožkov. Radionuclides in deposition in the Ignalina NPP region in 2005. **Proceedings of the 3rd International Conference „Metals in the Environment“**, 53-60, ISBN 978-9955-555-12-4 (2006).
7. R. Jasiulionis and A. Rožkov. ^{137}Cs in the ground-level air and deposition in the Ignalina Nuclear Power Plant region. **American Institute of Physics Conference Proceedings** vol 889, 417-418, ISSN 0094-243X (2007).

Pranešimai konferencijose

Darbo rezultatai pristatyti šešiose tarptautinėse ir keturiose nacionalinėse konferencijose ir dviejuose seminaruose Fizikos institute:

1. R. Jasiulionis, A. Rožkov. Radionuklidai pažemio ore ir iškritose Ignalinos AE aplinkoje. **36-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija**, 2005 m. birželio 16-18 d., Vilnius. Tezės konferencijos rinkinyje (p. 170, ISBN 9986-9284-5-1).
2. R. Jasiulionis, A. Rožkov. Radionuclides in deposition in the Ignalina NPP region in 2005. **3rd International Conference “Metals in the Environment”**, 2006 m. balandžio 26-29 d., Vilnius. Tezės konferencijos rinkinyje “Abstracts” (p. 115-117, ISBN 9955-608-33-1).
3. A. Rožkov, R. Jasiulionis. ^{137}Cs pernaša iš Černobylio regiono. **Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija**, 2006 m. balandžio 7 d.
4. A. Rožkov. ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{54}Mn pažemio ore ir iškritose Ignalinos atominės elektrinės aplinkoje 2004-2006 metais. **Fizikos instituto doktorantų konferencija**, 2006 m. birželio 23 d.
5. R. Jasiulionis, A. Rožkov. ^{137}Cs in the ground-level air and deposition in the Ignalina Nuclear Power Plant region. **6th International Conference of the Balkan Physical Union**, 2006 m. rugpjūčio 22-26 d., Stambulas, Turkija. Tezės konferencijos rinkinyje “Book of Abstracts” (p. 998).
6. R. Jasiulionis, A. Rožkov. Ionizing radiation doses in the environment of the Ignalina nuclear power plant. **7th International Scientific Conference „Sakharov Readings 2007: Environmental problems of the XXI century“**, 2007 m. gegužės 17-18 d., Minskas, Baltarusija. Tezės konferencijos rinkinyje (p. 185, ISBN 978-985-6823-33-9);
7. R. Jasiulionis, A. Rožkov, L. Vyčinas, D. Daudžvardis. ^{41}Ar spinduliavimo matavimas „*in situ*“ Ignalinos AE aplinkoje. **37-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija**, 2007 m. birželio 11-13 d., Vilnius. Tezės konferencijos rinkinyje (p. 165, ISBN 978-9955-33-030-1).
8. R. Jasiulionis, A. Rožkov. ^{137}Cs Ignalinos AE regiono pažemio ore. **37-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija**, 2007 m. birželio 11-13 d., Vilnius. Tezės konferencijos rinkinyje (p. 164, ISBN 978-9955-33-030-1).

9. R. Jasiulionis, A. Rožkov. The solubility of the aerosol – ^{137}Cs and ^{60}Co carrier – in the Ignalina nuclear power plant region. **European Aerosol Conference 2007**, 2007 m. rugsėjo 9-14 d., Zalcburgas, Austrija. Tezių (Nr. T10A003) elektroninė versija interneto svetainėje <http://www.gaef.de/EAC2007/> ir kompaktiniame diske „EAC 2007. Program and Abstracts“.
10. A. Rožkov. Ignalinos AE išlėkų ir pažemio oro aerolio – ^{60}Co ir ^{137}Cs nešėjo – tirpumo vandenyje vertinimas. **Fizikos instituto Branduolinių ir aplinkos radioaktyvumo tyrimų laboratorijos seminaras**, 2008 m. kovo 6 d.
11. R. Jasiulionis, A. Rožkov. The dynamics of the aerosol solubility of the aerosol – ^{137}Cs carrier – in the system „Ignalina Nuclear Power plant – Environment“. **European Aerosol Conference 2008**, 2008 m. rugpjūčio 24-29 d., Thessaloniki, Graikija. Tezių (Nr. T06A181P) elektroninė versija interneto svetainėje <http://www.eac2008.org/> ir kompaktiniame diske „EAC 2008. Program and Abstracts“.
12. V. Remeikis, R. Jasiulionis, L. Vyčinas, A. Rožkov. Radionuklidai reaktoriaus RBMK-1500 ventiliacinėje sistemoje. **38-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija**, 2009 m. birželio 8-10 d., Vilnius. Tezės konferencijos rinkinyje (p. 173, ISBN 978-9955-33-447-7).
13. R. Jasiulionis, A. Rožkov. Radionuklidai Ignalinos AE regiono pažemio ore. **38-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija**, 2009 m. birželio 8-10 d., Vilnius. Tezės konferencijos rinkinyje (p. 221, ISBN 978-9955-33-447-7).
14. R. Jasiulionis, A. Rožkov. The solubility and leaching of aerosol particles – radionuclide carriers – collected on filters in the ventilation system of the Ignalina Nuclear Power Plant. **European Aerosol Conference 2009**, 2009 m. rugsėjo 6-11 d., Karlsruhe, Vokietija. Tezių (Nr. T123A02) elektroninė versija interneto svetainėje <http://www.gaef.de/EAC2009/> ir kompaktiniame diske „EAC 2009. Program and Abstracts“.

Doktoranto atlikto eksperimentinio darbo indėlis

- Ignalinos AE poveikio zonoje, veikiančioje FI stotyje, paimta 180 pažemio oro aerolio dalelių ir 12 iškritų bandinių. Išmatuoti radionuklidų aktyvumai bandiniuose branduolinės gama spektrometrijos metodu.
- atlikti pažemio ore ir Ignalinos AE ventiliacinės sistemos dujose surinktų aerolio dalelių, radionuklidų nešėjų, bandinių išplovimo distiliuotu vandeniu eksperimentai. Viso išanalizuota 40 bandinių.
- atlikti radionuklidų aktyvumo koncentracijų pažemio ore ir iškritose Ignalinos AE regione skaičiavimai, naudojant priemaišų pernešimo lokaliniame mastelyje modelius.
- pranešėjas devyniose mokslinėse konferencijose.
- moksliniai straipsniai rengti kolektyviai kartu su vadovu.

Padėka

Nuoširdžiai dėkoju dr. Rimvydui Jasiulioniui už puikų vadovavimą disertaciniam darbui. Dėkoju Fizikos instituto direktoriui prof. dr. Vidmantui Remeikiui, dr. Nikolaj Tarasiuk, dr. Rūtai Druteikienei, dr. Narcizai Špirkauskaitei ir visiems Branduolinių ir aplinkos radioaktyvumo tyrimų laboratorijos darbuotojams už diskusijas, pastabas ir patarimus svarstant disertacinį darbą laboratorijos ir instituto seminaruose. Taip pat norėčiau padėkoti Michailui ir Tatjanai Litvinovams už pagalbą imant aerolio dalelių bandinius Ignalinos AE ventiliaciniame kamine bei Ruslanui Jerenkevičui už Ignalinos AE meteorologinius duomenis.

LITERATŪROS APŽVALGA

1. Dirbtiniai radionuklidai pažemio ore

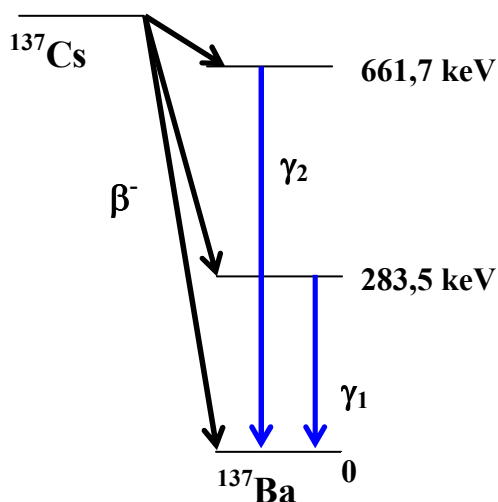
Dirbtiniai radionuklidai patenka į aplinką visose branduolinės energetikos ciklo grandyse ir visose atominių elektrinių paleidimo, darbo ir eksploatacijos nutraukimo stadijose.

^{137}Cs yra vienas iš ilgaamžių urano dalijimosi produktų, turintis dujinį pirmtaką ir trumpaamžį skilimo produktą, spinduliuojantį patogius registracijai gama kvantus. Praėjus daugeliui metų po branduolinio ginklo bandymų atmosferoje ir virš 20 metų po avarijos Černobylio AE globaliai pasiskirstęs ^{137}Cs nuolat registruojamas pažemio ore pasaulinėse radioekologinio monitoringo stotyse.

Cezis ($_{55}\text{Cs}$) – periodinės elementų lentelės IA grupės šarminis metalas, pasižymintis maža išorinio elektrono jonizacijos energija (3,9 eV) ir dideliu cheminiu aktyvumu.

Gamtoje sutinkamas vienas stabilus cezio izotopas ^{133}Cs . Dirbtiniu būdu pagaminta virš 20 cezio radioizotopų su masės skaičiais nuo 123 iki 144. Radioekologiniu požiūriu yra svarbūs trys ilgaamžiai cezio izotopai: ^{134}Cs ($t_{1/2}=2,07$ metų), ^{135}Cs ($t_{1/2}=2,3\times 10^6$ metų) ir ^{137}Cs ($t_{1/2}=30,08$ metų), kurie susidaro dalijantis uranui arba plutoniui.

1 pav. pateikiama supaprastinta ^{137}Cs skilimo schema, kurioje parodytas ^{137}Cs β^- skilimas į stabilų nuklidą ^{137}Ba ir iš jo sužadintų energetinių lygmenų spinduliuojami gama kvantai γ [18].



1 pav. Supaprastinta ^{137}Cs skilimo schema. Nurodytos $^{137\text{m}}\text{Ba}$ energetinių lygmenų energijos (keV). Šaltinis: Nudat2, 2008.

^{137}Cs β^- skilimo metu susidaro dukterinis $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ($t_{1/2}=2,6$ min.). 94,4 % β^- skilimo aktų (didžiausia β^- skilimo energija $\beta_{\text{max}} = 514,0$ keV) įvyksta į $^{137\text{m}}\text{Ba}$ sužadintą 661,7 keV energetinį lygmenį. Tikimybė skilimo metu iš karto susidaryti stabiliam ^{137}Ba branduoliui, esančiam pagrindiniame energetiniame lygmenyje, yra 5,6 % ($\beta_{\text{max}} = 1175,6$ keV). $5,8 \times 10^{-4}$ % β^- skilimo aktų ($\beta_{\text{max}} = 892,1$ keV) įvyksta į $^{137\text{m}}\text{Ba}$ sužadintą 283,5 keV energetinį lygmenį.

Sužadinto dukterinio $^{137\text{m}}\text{Ba}$ perėjimas iš sužadintos izomerinės būsenos į stabilaus ^{137}Ba pagrindinį lygmenį įvyksta dviem konkuruojančiais būdais: gama kvanto (γ) išspinduliavimas arba konversinio elektrono išlėkimas iš bario atomo K ($CE K$) arba L ($CE L$) sluoksnio, lydymas charakteringąja Rentgeno spinduliuote (X) arba Ožė-elektronais ($Ožė-e$).

1 lentelėje pateiktos iš $^{137\text{m}}\text{Ba}$ branduolio ir atomo elektronų sluoksnių skilimo metu išlekiančios įkrautos dalelės, Rentgeno fotonai ir gama kvantai bei jonizuojančiųjų dalelių emisijos tikimybės vienam skilimui.

1 lentelė. Jonizuojančiųjų dalelių spinduliavimo tikimybės skylant $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Šaltinis: Nudat2, 2008.

| Spinduliuotės tipas | Energija, keV | Emisijos tikimybė, % |
|---------------------|---------------|----------------------|
| γ_1 | 283,5 | $5,8 \times 10^{-4}$ |
| γ_2 | 661,7 | 85,1 |
| $CE K$ | 624,2 | 7,7 |
| $CE L$ | 655,7 | 1,4 |
| XL_1 | 4,5 | 0,9 |
| XK_1 | 31,8 | 2,0 |
| XK_2 | 32,2 | 3,6 |
| XK_3 | 36,3 | 0,3 |
| XK_4 | 36,4 | 0,7 |
| XK_5 | 37,3 | 0,2 |
| $Ožė-eL$ | 3,7 | 7,3 |
| $Ožė-eK$ | 26,4 | 0,8 |

^{137}Cs yra amžinoje pusiausvyroje su $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Tai leidžia gama spektrometriškai išmatavus bandinio energetinį gama spektrą, pagal intensyvią 661,7 keV spektro liniją apskaičiuoti $^{137\text{m}}\text{Ba}$ aktyvumą ir, atitinkamai, ^{137}Cs aktyvumą bandinyje. Literatūroje 661,7 keV energetinio gama spektro linija dažnai dėl paprastumo priskiriama ^{137}Cs .

Dideli ^{137}Cs kiekiai pateko į aplinką praeitame šimtmetyje, vykdant branduolinio ginklo bandymus ir įvykus avarijoms branduolinės energetikos

objektuose. Šiuo metu aplinkos komponentėse ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos yra artimos jų registravimo branduolinės spektrometrijos metodais aptikimo ribai.

1.1 Radionuklidai aplinkoje po branduolinio ginklo bandymų atmosferoje

Dirbtinės kilmės radionuklidų patekimo į aplinką pradžia susijusi su branduolinio ginklo bandymais atmosferoje. Per sąlyginai trumpą branduolinių bandymų atmosferoje laiką, 1945-1980 metais, aplinką pasiekė didelis dirbtinės kilmės dalijimosi produktų kiekis, kuris paplito po visą Žemę ir lėmė ilgalaikį poveikį žmonijai ir aplinkai globaliu mastu [12].

Branduolinio ginklo galia ir reikšmė buvo suvokta po įvykdyto atominės bombos sprogdinimo Trinity Site poligone (JAV) 1945.07.16 ir kiek vėliau numetus branduolines bombas ant Hiroshima ir Nagasaki miestų 1945.08.05 ir 1945.08.09. Paskutinis branduolinio ginklo bandymas atmosferoje buvo įvykdytas 1980 m. spalio 16 d. Kinijoje.

Požeminiai branduolinių įtaisų sprogdinimai vykdomi iki šiol. Šiuo atveju dalis dalijimosi produktų neišvengiamai patenka į atmosferą [19, 20].

Iki 1980 metų, t.y. per 35 metus, buvo įvykdyti 543 branduolinio ginklo bandymai atmosferoje, kurių suminė galia siekė 440 Mt. Intensyviausiai bandymus vykdė TSRS ir JAV, kurios susprogdino po 219 branduolinių įtaisų. Bandymų skaičiaus maksimumas yra 1961-1962 metais, kai buvo susprogdinta 340 Mt suminės galios branduolinių įtaisų.

Bendras požeminių bandymų skaičius siekia 1900, o jų suminė galia – 90 Mt. Paskutinis užregistruotas bandymas (0,5-1 kt) įvykdytas Korėjos Liaudies Demokratinėje Respublikoje 2006.10.09 [21]. Palyginus su atmosferiniais bandymais, požeminių bandymų poveikio aplinkai pasekmės yra ženkliai mažesnės.

Sprogstant branduoliniam įtaisui, per milijonines sekundės dalis, jo ribotame tūryje temperatūra pasiekia milijonus laipsnių. Visos medžiagos, įskaitant urano (^{235}U , ^{238}U) arba plutonio (^{239}Pu) dalijimosi skeveldras, nesureagavusį uraną arba plutoną bei aktyvuotą įtaiso konstrukcinę dalį, akimirksniu virsta jonizuotomis dujomis. Susidaręs ugnies kamuolys greitai plinta, o dėl staiga sumažėjusio medžiagos tankio sprogdimo epicentre jis kyla į viršų. Dalijimosi produktai išmetami į viršutinius troposferos sluoksnius.

Termobranduolinio sproginimo metu (kai įtaiso galia didesnė, nei 1 Mt) didžioji dalis urano ir plutonio dalijimosi energijos sunaudojama termobranduolinės reakcijos aktyvacijai, o termobranduolinės reakcijos energija yra tokia galinga, kad jonizuoti dalijimosi produktai ir termobranduolinės sintezės produktai oro konvekciniiais srautais, susidaranciais sproginimo metu, inžektuojami net į 15-20 km aukštį, į stratosferą. To pasekoje po daugelio termobranduolinio ginklo bandymų susiformavo ilgaamžių dirbtinių radionuklidų stratosferinis rezervuaras. Į stratosferą iki 70 % radionuklidų pateko 1961-1962 metais, kai buvo bandomi didelės galios branduoliniai įtaisai. 2 lentelėje pateikiamos kai kurių ilgaamžių dalijimosi produktų, pasiekusių atmosferą branduolinio ginklo bandymų 1945-1980 metais, charakteristikos.

2 lentelė. Branduolinio ginklo bandymų metu (1945-1980) susidarantys dalijimosi produktai ir kai kurios jų charakteristikos. Šaltinis: UNSCEAR, 2000.

| Dalijimosi produktas | Pusėjimo trukmė, metai | Vidutinis susidarymas branduolinio ginklo sproginimo metu, 10^{15} Bq Mt ⁻¹ | Emisija į atmosferą, 10^{15} Bq |
|----------------------|------------------------|--|-----------------------------------|
| ³ H | 12,32 | 740 | 186 000 |
| ⁹⁰ Sr | 28,90 | 730 | 117 000 |
| ¹³⁷ Cs | 30,08 | 5,90 | 948 |
| ¹⁴ C | 5730 | 0,85 | 213 |
| ²⁴¹ Pu | 14,29 | - | 142 |

Aukštuose atmosferos sluoksniuose, vėstant ugnies kamuoliui, dalijimosi produktai iš dujinės (garų) fazės vykstant kondensacijai formuoja sferinės formos submikroninio dydžio daleles (0,02-0,2 μm) [22].

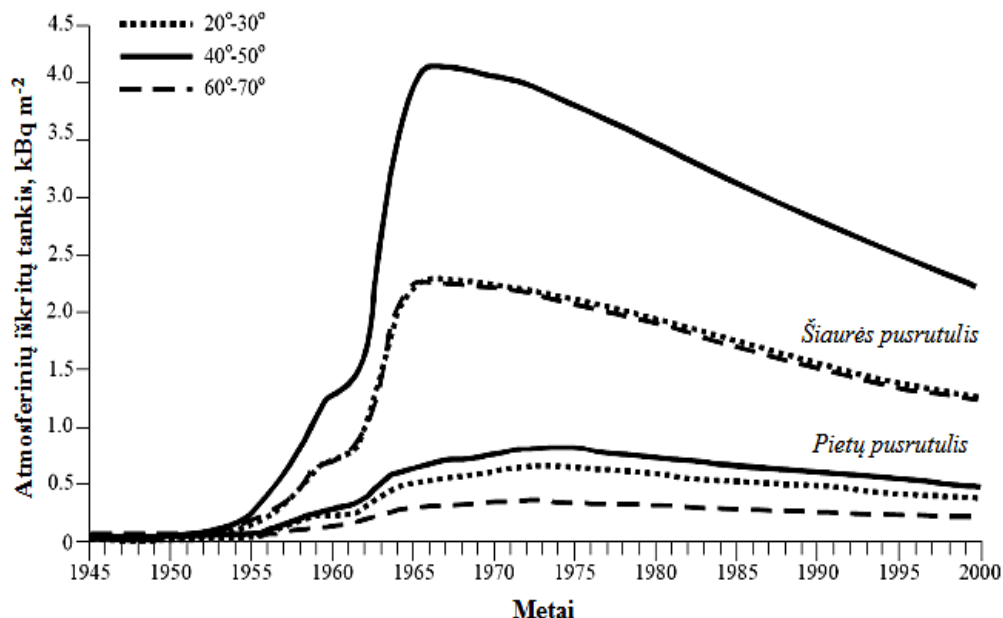
Atskirų radionuklidų kondensacija dėl skirtingų jų perėjimo iš dujinės fazės į skystį temperatūrų vyko skirtinguose atmosferos aukščiuose. ¹³⁷Cs ir lakių dalijimosi produktų, turinčių dujinius pirmtakus (pvz., ⁸⁹Sr, ⁹⁰Sr), frakcionavimas vyko kartu. Tai rodo išmatuoti radionuklidų santykiai atmosferinėse iškritose, surinktose įvairiose pasaulio vietose 1958-1985 metais. Radionuklidų aktyvumų santykių reikšmių artumas ir pasikartojamumas iškritų bandiniuose rodo, kad ¹³⁷Cs ir ⁹⁰Sr patekimo į atmosferą, pasiskirstymo ir pašalinimo iš jos mechanizmai yra panašūs. Žinoma, kad dalelėms būdingas nehomogeniškas dalijimosi produktų pasiskirstymas, kai lakieji produktai susikaupia aerozolio dalelių paviršiniuose sluoksniuose: lakūs higroskopiniai radionuklidai (¹³⁷Cs⁺, ⁹⁰Sr²⁺) išsidėsto išoriniame dalelių sluoksnyje ir

aktyviai sąveikauja su vandens molekulėmis [23]. Nustatyta, kad iškritose iš stratosferinio rezervuaro iki 70 % ^{137}Cs buvo tirpioje aerozolio dalelių frakcijoje [24].

Stratosferoje susikaupę dalijimosi produktai, vykstant oro masių cirkuliacijai, pernešami į žemesnius atmosferos sluoksnius. Submikroninės dalelės, dalijimosi produktų nešėjos, iš stratosferos į žemesnius atmosferos sluoksnius patekdavo dėl sezoninių tropopauzės aukščio svyravimų, per tropopauzės trūkius su sraujymėmis, dėl radionuklidų nešėjų difuzijos per tropopauzę bei išsivystant galingiems aukštuminiams ciklonams [25]. Vidutinis daugiametis tropopauzės virš Lietuvos aukštis žiemą yra 9,8 km (vasario mėn.), vasarą – 11,2 km (liepos mėn.) [26].

Viršutinėje troposferoje iki debesų susidarymo zonos aerozolio dalelių pernašos greičiai mažiausi. Debesų susidarymo aukštyje dalis aerozolio dalelių tampa kondensacijos branduoliais. Dalijimosi produktų platuminis koncentracijų pasiskirstymas atmosferinėse iškritose priklauso nuo kritulių kiekio vietovėje ir intensyvumo, aerozolio dalelių, radionuklidų nešėjų, koncentracijos ore ir skirtingų radionuklidų nešėjų cheminių ir fizikinių savybių skirtumų. Atmosferos savivalai nuo radionuklidų sauso klimato zonose svarbūs yra aerozolio dalelių sauso nusėdimo ant žemės paviršiaus procesai.

Įvertintos metinės ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos iškritose skirtingų platumų regionuose (2 pav.).



2 pav. Metinės ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos iškritose (kBq m^{-2}) skirtingų platumų regionuose, neįvertinant avarijos Černobylio AE indėlio Europos šalims. Šaltinis: UNSCEAR, 2000.

1.2 ^{137}Cs patekimas į aplinką po avarijos Černobylio AE

1986.04.26 01:23 (Maskvos laiku) Černobylio AE 4 bloke įvyko didžiausia branduolinės energetikos istorijoje avarija [27]. Avarijos metu branduolinis reaktorius buvo sugriautas, į atmosferą pateko didžiuliai radionuklidų kiekiai, kurie pasklido visame Šiaurės pusrutulyje, o ^{137}Cs iki šiol registruojamas gamtinėje aplinkoje.

Fizikos instituto geofizinėje stotyje automatinio gama dozimetru Černobylio AE avarijos debesies radionuklidų spinduliavimas buvo užregistruotas 1986.04.29 23 val. Didžiausia ^{137}Cs aktyvumo koncentracija ore $0,5 \text{ Bq m}^{-3}$ užregistruota oro bandinyje surinktame naktį iš balandžio 29 d. į 30 d. [28].

Dalijimosi produktų emisija iš sugriauto reaktoriaus į atmosferą buvo skirtinga skirtingais laikotarpiais nuo avarijos pradžios ir priklausė nuo temperatūros režimo sugriauto reaktoriaus aktyviojoje zonoje.

3 lentelėje parodyti branduolinio kuro dalijimosi produktų aktyvumai Černobylio AE reaktoriaus aktyvioje zonoje iki avarijos ir išlėkose į atmosferą 1986.04.26-05.07.

3 lentelė. Radionuklidų aktyvumai reaktoriaus aktyviojoje zonoje iki avarijos, Q_0 , ir išlėkose į atmosferą 1986.04.26-05.07, Q_1 . Radionuklidų aktyvumai perskaičiuoti 1986.05.06, duomenų paklaida iki 50 %. Šaltinis: Europos komisija/Gidromet, 1998.

| Dalijimosi produktas | Radionuklidų aktyvumas | | $Q_1/Q_0, \%$ |
|----------------------|--|--|---------------|
| | reaktoriaus aktyvioje zonoje iki avarijos, $Q_0, 10^{15} \text{ Bq}$ | išlėkose į atmosferą 1986.04.26-05.07, $Q_1, 10^{15} \text{ Bq}$ | |
| ^{133}Xe | 6500 | 6500 | 100 |
| ^{131}I | 3200 | 1200-1700 | 38-53 |
| ^{137}Cs | 280 | 74-85 | 26-30 |
| ^{90}Sr | 200 | 8 | 4 |
| ^{140}Ba | 4800 | 170 | 3,5 |
| ^{95}Zr | 5600 | 170 | 3 |

Temperatūros režimo ypatumai avarijos metu sugriautame branduoliniame reaktoriuje lėmė skirtingas išlekiančių į orą dalelių fizikines-chemines savybes, izotopinę sudėtį ir pasiskirstymą pagal dydį. Radionuklidų emisija iš Černobylio AE branduolinio reaktoriaus avarijos metu skirstoma į keturias fazes, ir kiekvienai fazei būdingi skirtingi aktyviojoje zonoje vykstantys procesai [29-31].

1 fazė (1986.04.26-27). Įvykus branduolinio reaktoriaus šiluminiam sproгимui, prasidėjo grafito degimas ir dalis branduolinio kuro buvo išsklaidyta aplink reaktorių. Dideli inertinių dujų, jodo izotopų ir lakiųjų dalijimosi produktų (pav., cezio) kiekiai pateko į atmosferą ir išlėkų aukštis siekė 1200-1500 m. Radionuklidų emisija į orą 1 fazės laikotarpiu vertinama apie 12 MCi.

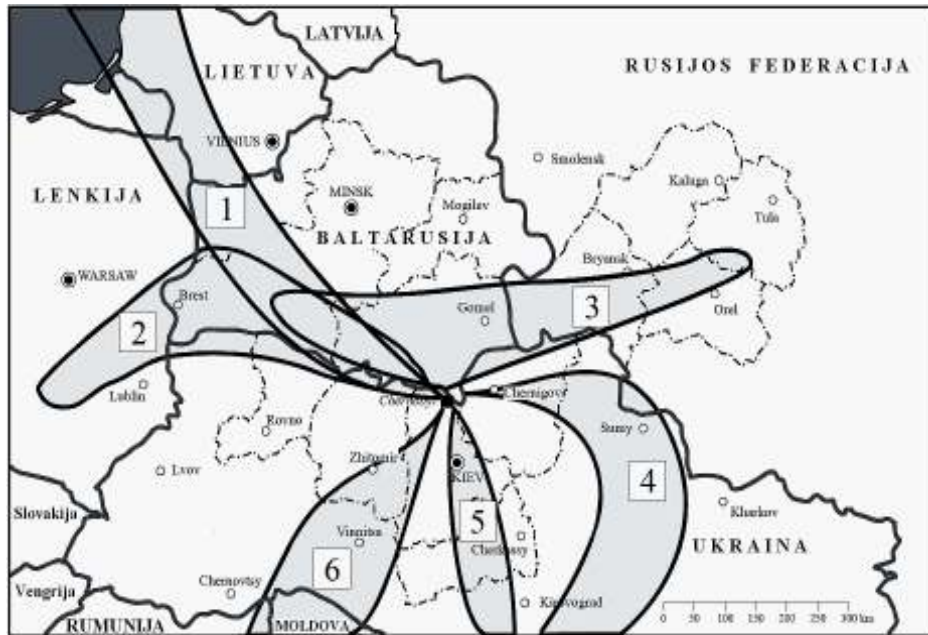
2 fazė (1986.04.28-05.02). Gaisras buvo užgesintas, tai sumažino grafito klotinio temperatūrą. Vykstant branduolinio kuro oksidacijai reaktoriuje, susidarė sunkiai besilydančių ir disperguotų dalijimosi produktų „karštosios“ dalelės, kurios turbulentiniais ir advekciniiais oro srautais buvo išsklaidytos dideliais atstumais nuo avarijos epicentro. Nelakių dalijimosi produktų santykiai „karštosiose“ dalelėse buvo artimi dalijimosi produktų santykiams branduoliniame kure. „Karštosios“ dalelės buvo netaisyklingų formų, o jų paviršiniuose sluoksniuose gausu įvairiausių priemaišų (suodžių, išsilydžiusių konstrukcinių sistemų elementų). Išlėkų aukštis sumažėjo iki 200-400 m.

3 fazė (1986.05.03-06). Prasidėjo grafito blokų oksidacija reaktoriaus aktyviosios zonos viduje, ir grafito temperatūra pakilo iki 2000 °C [32]. Reaktoriuje likęs po sproгимo branduolinis kuras ir aktyviosios zonos konstrukciniai elementai išsilydė ir per ertmes nutekėjo po branduolinio reaktoriaus centrine sale. Iš branduolinio kuro išsilaisvino ir iki 1200 m aukščio į atmosferą išlėkė lakieji radionuklidai. Vėstant išlėkų kamuoliui, dalijimosi produktai iš dujinės fazės kondensavosi, sudarydami smulkias daleles. Jų savybės buvo artimos branduolinių sproginimų metu atmosferoje susidariusių dalelių savybėms. Smulkios kondensacinės dalelės, radionuklidų nešėjos, buvo nešamos oro masėmis didžiuliais atstumais nuo šaltinio ir pasklido teritorijose, labai nutolusiose nuo avarijos epicentro.

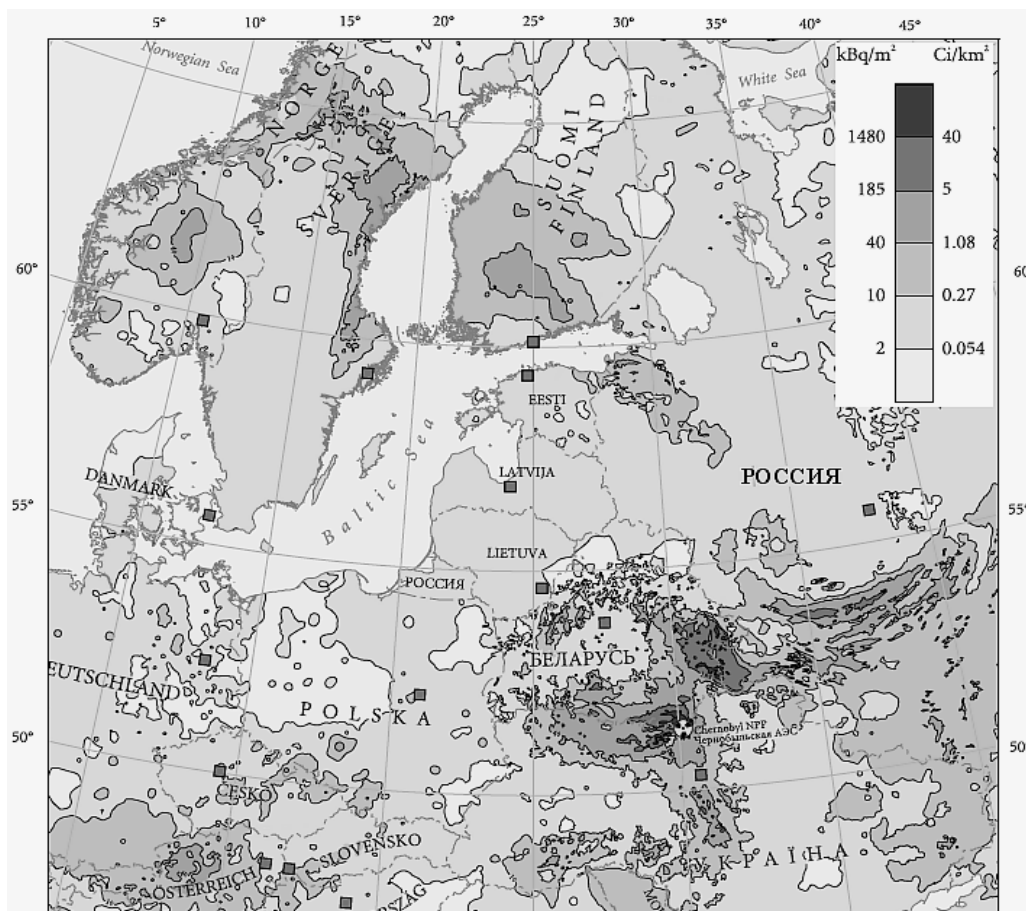
4 fazė (1986.05.07-14). Staigus grafito oksidacijos proceso ir radionuklidų emisijos sumažėjimas.

Priklausomai nuo oro masių pernašos krypties radionuklidų emisijos metu ir vėliau, radionuklidai buvo išsklaidyti įvairiomis kryptimis nuo Černobylio AE (3 pav.) [33, 34]. Iš viso, įvykus Černobylio AE avarijai, į aplinką pateko apie 80×10^{15} Bq ^{137}Cs . Europoje 200 000 km² ploto teritorijose ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos atmosferinėse iškritose viršijo 40 kBq m⁻².

4 pav. pavaizduotas „bombinio“ ir Černobylio kilmės ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos dirvožemio paviršiuje Europoje.



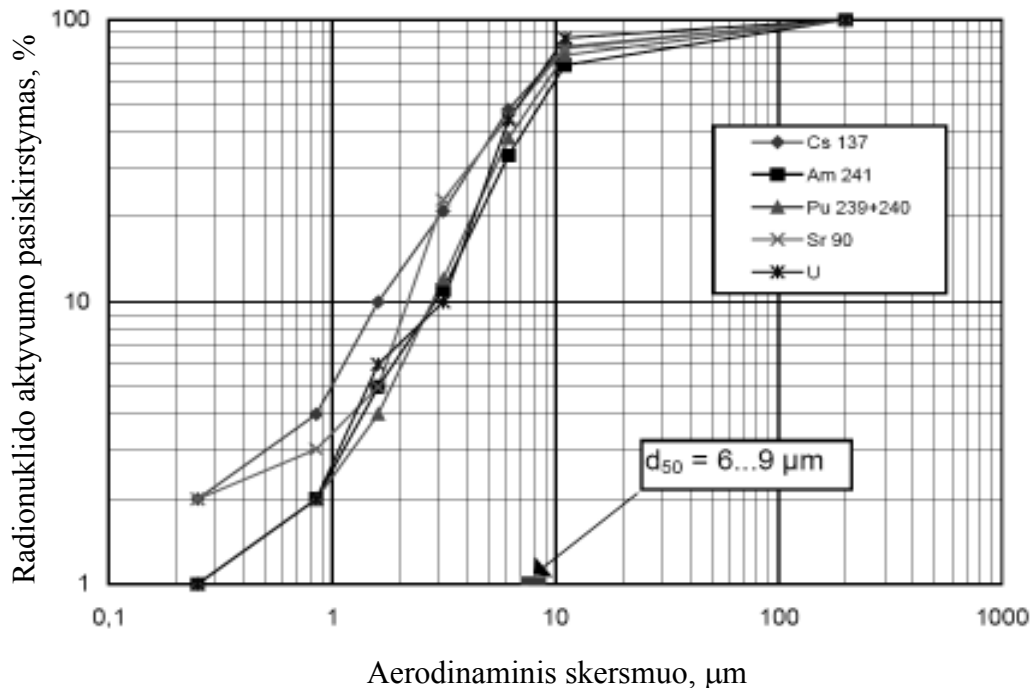
3 pav. Černobylio AE avarijos metu užterštų oro masių trajektorijos skirtingais laikotarpiais (data ir valanda Grinvičo laiku): 1) 1986.04.26 00:00, 2) 04.27 00:00, 3) 04.27 12:00, 4) 04.29 00:00, 5) 05.02 00:00, 6) 05.04 12:00. Šaltinis: IAEA, 2006.



4 pav. ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos dirvožemio paviršiuje Europoje (aktyvumas perskaičiuotas 1986.05.10 datai). Šaltinis: Europos komisija/Gidromet, 1998.

Pastaruoju metu pasirodė publikacijos apie dar vieną ^{137}Cs emisijos į aplinką šaltinį – Černobylio AE sarkofagą, kuris yra 1986 m. lapkričio mėn. įrengtas inžinerinis statinys virš Černobylio AE sugriauto 4 bloko, skirtas lokalizuoti avarijos padarinius. Vertinama, kad „sarkofage“ yra apie 150 t branduolinio kuro, kurio didžioji dalis yra betono ir grafito lydinyje po centrine sale [35].

Kasmet į „sarkofagą“ per plyšius ir paviršiaus įtrūkimus jo konstrukcijoje patenka apie 2000 m^3 kritulių. Dar 600 m^3 vandens jame susikondensuoja dėl temperatūrų skirtumų „sarkofago“ viduje ir išorėje. Veikiami vandens branduolinio kuro lydiniai disperguojasi, nuolat susidaro aerozolio dalelės, kurios dėl natūralių ventilacijos procesų patenka į patalpas po „sarkofago“ stogu [36]. Šiuo metu po „sarkofago“ stogu yra keletas tonų dulkių, kurių aktyvumo koncentracija siekia $10^5\text{--}10^7\text{ Bq m}^{-2}$. Virš pusės po stogu esančių dulkių yra mažesnės nei $10\text{ }\mu\text{m}$ (5 pav.) [37].



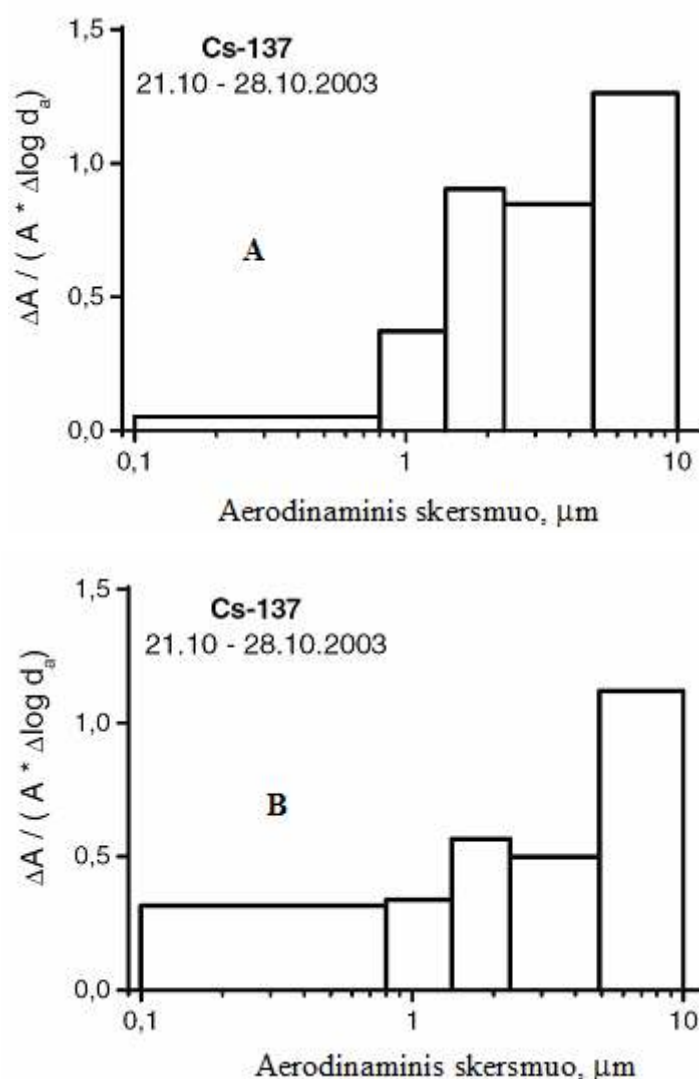
5 pav. Radionuklidų aktyvumo pasiskirstymas skirtingo aerodinaminio skersmens dulkėse po „sarkofago“ stogu. d_{50} – aerozolio aktyvumo medianinis aerodinaminis skersmuo. Šaltinis: Pretzch, 2004.

Dalis dulkių patenka į aplinką per Černobylio AE 3 bloko 100 m aukščio ventiliacinį kaminą. Kita dalis dulkių dėl temperatūrinių ir slėgio skirtumų „sarkofago“ viduje ir išorėje pastoviai lekia pro plyšius stoge į orą. Plyšių stoge plotas

siekia 120 m^2 . Vidutinis oro debitas per ventiliacinį kaminą yra $(45-47) \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ žiemą ir $(7-11) \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ vasarą, o pro plyšius – iki $900 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

1996-1999 metais vidutinė metinė radionuklidų emisija pro plyšius sudarė $8,6 \times 10^9 \text{ Bq}$, o 2005 metais – $2,9 \times 10^8 \text{ Bq}$. Beveik 80 % aktyvumo išlėkose lėmė ^{137}Cs spinduliuotė. ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore šalia plyšių buvo apie $0,2-5,0 \text{ Bq m}^{-3}$, o išlėkose per ventiliacinį kaminą buvo 10-100 kartų mažesnės [40-44].

6 pav. pateikiamas dulkių dalelių, ^{137}Cs nešėjų, pasiskirstymas pagal dydį ore šalia „sarkofago“ stogo plyšio pietinėje dalyje (A) ir 50 m į pietus nuo „sarkofago“ (B).



6 pav. Dulkių, ^{137}Cs nešėjų, pasiskirstymas pagal dydį ore šalia „sarkofago“ stogo plyšio pietinėje dalyje (A) ir 50 m į pietus nuo Sarkofago (B). Aerozolio dalelių bandiniai paimti 2003.10.21-28. Šaltinis: Ogorodnikov, 2006.

Iki šiol avarijos sugriautas Černobylio AE branduolinis reaktorius išlieka svarbiu radionuklidų emisijos į orą šaltiniu 30 km zonoje aplink elektrinę [45].

Šiuo metu ^{137}Cs patekimas į aplinką yra nepalyginamai mažesnis negu kad buvo branduolinio ginklo bandymų atmosferoje laikotarpiu ir įvykus Černobylio AE avarijai.

1.3 Šiuolaikiniai ^{137}Cs šaltiniai aplinkoje

Šiuo metu globalūs ^{137}Cs patekimo į atmosferą šaltiniai yra branduolinės energetikos objektai.

1. Radionuklidai patenka į atmosferą kartu su išlėkomis iš panaudoto branduolinio kuro perdirbimo gamyklų. 1997 metais ^{137}Cs emisija į orą iš Sellafield (D. Britanija) branduolinio kuro perdirbimo gamyklos buvo apie 6 MBq, ir kiek mažiau iš La Hague (Prancūzija) [12]. Panaudoto branduolinio kuro perdirbimas arba laidojimas išlieka potencialiu aplinkos taršos šaltiniu, kol nebus sukurti saugesni panaudoto branduolinio kuro tvarkymo būdai.

2. Radionuklidai į orą patenka avarinių situacijų pasaulio atominėse elektrinėse metu. 4 lentelėje pateikiamas TATENA INES skalėje suklasifikuotų avarijų pasaulio AE sąrašas [46].

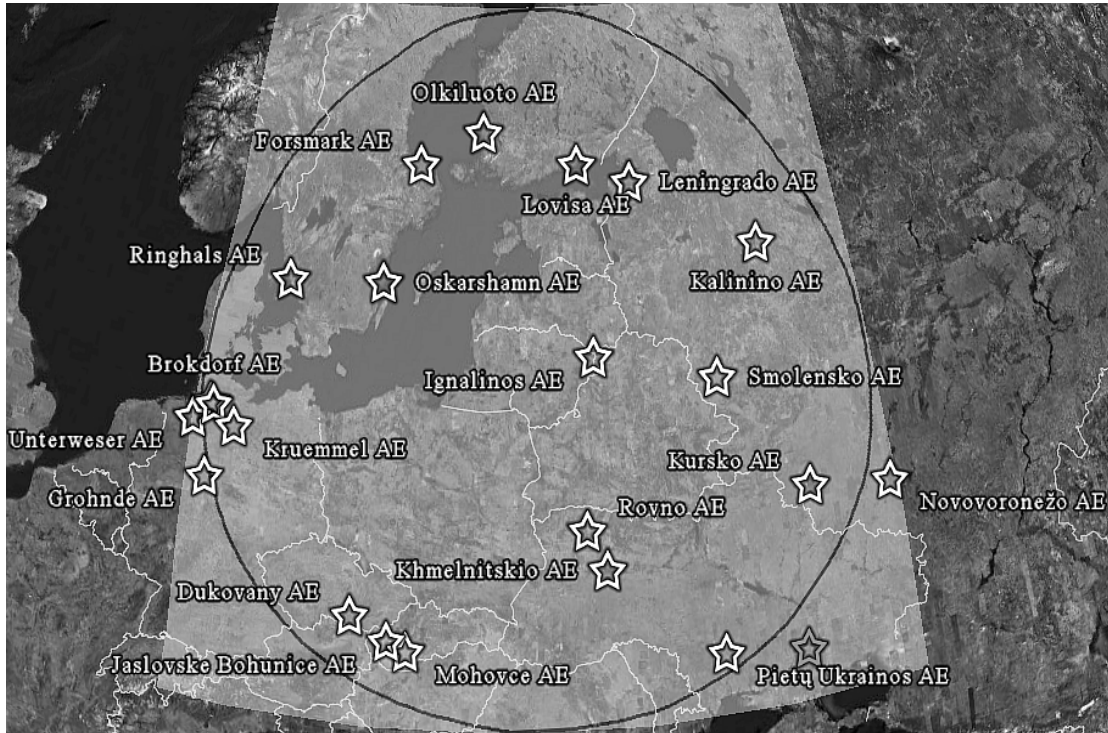
4 lentelė. Branduolinių įvykių, suklasifikuotų pagal TATENA INES skalę, atominėse elektrinėse sąrašas. *Šaltinis: IAEA, 2008.*

| Tarptautinė branduolinių įvykių skalė (INES) | Atominė elektrinė, šalis | Metai |
|--|----------------------------------|---------------|
| 7 | Černobylio AE, TSRS | 1986 |
| 5 | Three Mile Island AE, JAV | 1979 |
| 4 | Jaslovske Bohunice AE, Slovakija | 1977 |
| | Saint-Laurent AE, Prancūzija | 1980 |
| | Tokaimura AE, Japonija | 1999 |
| 3 | Paks AE, Vengrija | 2003 |
| 2 | Forsmark AE, Švedija | 2007 |
| | Asco AE, Ispanija | 2008 balandis |
| 1 | Tricastin AE, Prancūzija | 2008 liepa |

3. Pasulyje šiuo metu veikia 439 branduolinių reaktorių, kurių suminė elektrinė galia siekia 372 GW. Pusė visų branduolinių reaktorių yra trijose pasaulio

valstybėse: JAV, Japonijoje ir Prancūzijoje. Šiuo metu statomi dar 33 branduoliniai reaktoriai, daugiausiai Rusijos Federacijoje, Indijoje ir Kinijoje [47].

7 pav. pateiktos veikiančių atominių elektrinių, nutolusių 1000 km atstumu nuo Lietuvos geografinio centro (N 55° 19' 47,57", E 23° 54' 19,91"), tinklas.



7 pav. Veikiančios atominės elektrinės, nutolusios 1000 km atstumu (apskritimo skersmuo 1000 km) nuo Lietuvos geografinio centro (N 55° 19' 47,57", E 23° 54' 19,91"). Nuotrauka: Google Earth, 2007.

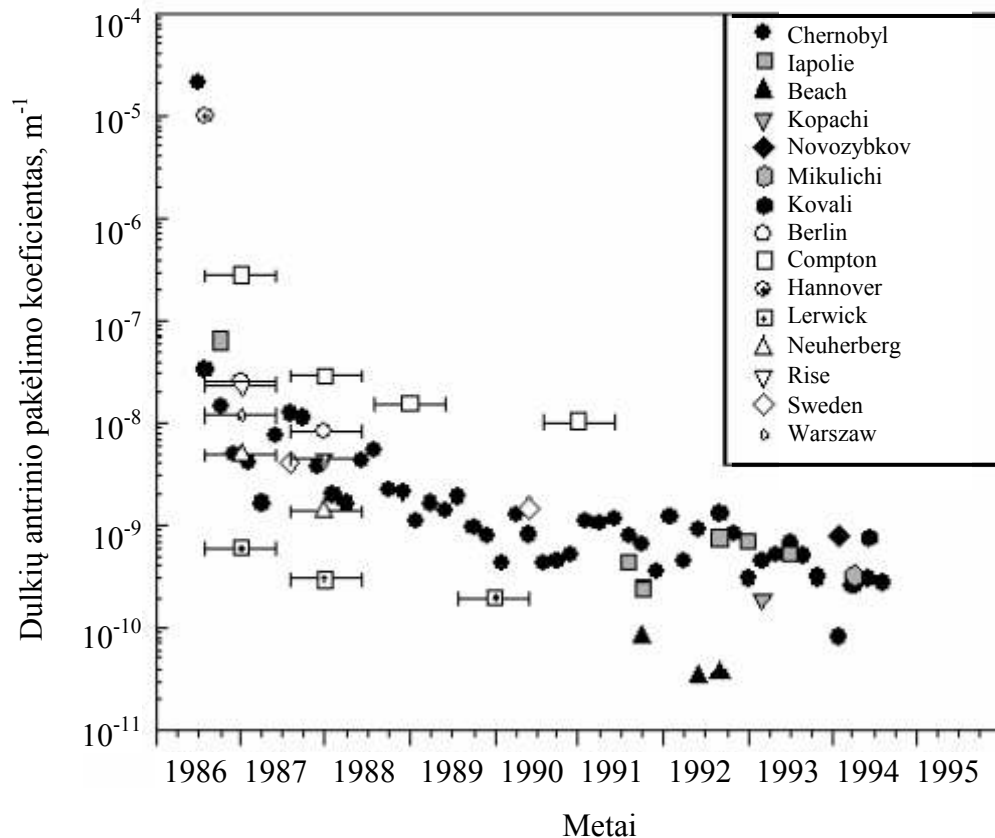
7 pav. matyti, kad esant palankiai vėjo kryptiai ir greičiui $3-4 \text{ m s}^{-1}$ beveik 20-ties atominių elektrinių išlėkos su oro masėmis teoriškai per tris paras (vidutiniškai tiek „gyvuoja“ oro masė) galėtų pasiekti Lietuvą.

1.4 ^{137}Cs antrinis pakėlimas į orą nuo dirvožemio paviršiaus

^{137}Cs antrinis pakėlimas nuo dirvožemio paviršiaus į orą buvo stebimas nuo pat branduolinio ginklo bandymų atmosferoje pradžios. Po avarijos Černobylio AE užterštose teritorijose buvo stebimi intensyvūs radionuklidų antrinio pakėlimo nuo dirvožemio paviršiaus procesai. Per kelis metus po avarijos radionuklidų antrinio

pakėlimo koeficientai greitai mažėjo nuo 10^{-5} iki 10^{-8} - 10^{-10} m^{-1} ir vėliau beveik nekito [48, 49].

8 pav. pateikiami dulkių, ^{137}Cs nešėjų, antrinio pakėlimo nuo dirvožemio paviršiaus koeficientai skirtingose Europos matavimų stotyse 1986-1995 metais [43].



8 pav. Dulkių, ^{137}Cs nešėjų, antrinio pakėlimo nuo dirvožemio paviršiaus koeficientai įvairiose matavimų stotyse Europoje 1986-1995 metais. Šaltinis: Garger, 2006.

Kaip seka iš 8 pav., po Černobylio AE avarijos didelėse teritorijose sistemoje „dirvožemio paviršius – oras“ greitai nusistovėjo pusiausvyra tarp dulkių, radionuklidų nešėjų, srauto iš oro į dirvožemio paviršių ir atgal nuo dirvožemio paviršiaus į orą.

Užterštose po Černobylio AE avarijos teritorijose atskirais laikotarpiais buvo stebimi ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore padidėjimai, susiję su aerozolio dalelių, ^{137}Cs nešėjų, antriniu pakėlimu nuo dirvožemio paviršiaus į orą esant antropogeninei veiklai, pavyzdžiui, sezoniniams žemės ūkio darbams ar intensyviai transporto judėjimui. Vykdamas žemės ūkio darbus ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore padidėja nuo šimto iki kelių tūkstančių kartų, palyginus su ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų

padidėjimu ore dėl vėjo sukkelto dulkių antrinio pakėlimo. Dulkių pakėlimas nuo ariamųjų plotų labiausiai priklauso nuo dirvožemio tipo ir drėgnumo [50, 51].

1.5 Gaisrai ir medienos deginimas – ^{137}Cs emisijos į pažemio orą šaltiniai

^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore padidėjimai po Černobylio AE avarijos užterštose teritorijose taip pat siejami su aerozolio dalelių, ^{137}Cs nešėjų, susidarymu ir pernaša degant miškams ar deginant radionuklidais užterštą medieną ar žolę. Po Černobylio AE avarijos ^{137}Cs aktyvumo koncentracija 4,2 milijonų ha miško plotuose Baltarusijoje, Rusijoje ir Ukrainoje siekė 40 kBq m⁻². Du trečdalius Černobylio AE 30 km stebėjimo zonos užima miškai ir pievos.

Černobylio AE 30 km stebėjimo zonoje per metus įvyksta 40-110 gaisrų. 1992-1994 metais joje išdegė 2,4-3,9 tūkst. ha, 2000 m. gegužės mėn. išdegė 1,5 tūkst. ha miškų ir durpynų. Dideli gaisrai įvyko 2001-2002 metais [43]. Paskutinį kartą 60 ha miško 10 km atstumu nuo Černobylio AE išdegė 2007.03.21-22. Visais atvejais gaisrų plitimą skatina sausi ir vėjuoti orai [52]. Ypatingai didelę grėsmę kelia padegami Černobylio AE 30 km stebėjimo zonoje palikti namų ūkiai, kai įsiliepsnoja atviro tipo radioaktyviųjų atliekų kapinynai ar prasideda ilgą giluminį degimą palaikantys durpynų gaisrai [53].

Degant miškui, ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore šalia gaisro židinio šuoliškai padidėja 200-700 kartų, net iki kelių Bq m⁻³. Gaisrų Černobylio AE stebėjimo zonoje 1992.07.28-31 modeliavimo rezultatai rodo, kad su dūmais į orą galėjo patekti iki kelių procentų biomasėje akumuliuoto ^{137}Cs , o ^{137}Cs emisija nuo paviršinio šaltinio (gaisravietės) gali siekti 10⁶ Bq s⁻¹ [54].

Gaisrų metu radionuklidai prikimba prie susidarančių aerozolio dalelių ir oro masėmis gali būti pernešami toli nuo gaisro židinio, ir tuomet radionuklidų aktyvumo koncentracijos aplinkos sanduose regiono ar lokaliu masteliu išsilygina [55, 56]. 5 lentelėje pateikiama gaisrų statistika Lietuvoje 2005-2008 metais [57].

5 lentelė. 2005-2008 metais gaisruose išdegę Lietuvos teritorijos plotai. Šaltinis: VPGT, 2005-2008.

| Gaisro židiny | Išdegęs plotas, km ² | | | |
|-----------------------|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 2005.03.29-07.19 | 2006.04.07-08.18 | 2007.03.14-06.25 | 2008.03.29-08.12 |
| Pieva | 25,98 | 326,11 | 28,90 | 49,27 |
| Miškas, miško paklotė | 0,58 | 12,44 | 0,80 | 1,11 |
| Durpinga pieva | 0,97 | 9,34 | 0,85 | 0,79 |
| Durpynas | 0,20 | 0,33 | <0,01 | 1,87 |
| Ražienos | 0,15 | 1,43 | 0,06 | 0,78 |

Kaip matyti 5 lentelėje, gaisrų metu labiausiai pagal plotą išdega pievos. Tačiau gaisrų metu miškuose sudega daugiau biomasės. Augmenijoje didžiausios ¹³⁷Cs aktyvumo koncentracijos yra išmatuotos spygliuose, lapuose ir jaunose šakelėse. Laikui bėgant, miško paklotė tampa svarbiu radionuklidų akumuliacijos šaltiniu. Gaisro metu temperatūra joje pasiekia 700-800 °C, kas pakanka, kad vyktų ¹³⁷Cs sublimacija (550-670 °C), o vėstant – ¹³⁷Cs nukleacija ir smulkių kondensacinių dalelių susidarymas. Netgi tuo atveju, kai viršutinis gaisras užgesintas, paklotės smilkimas išlieka aerolio dalelių emisijos į orą šaltiniu [58].

Aerolio dalelių bandiniuose, surinktose 2002.08.30 pažemio ore po beveik du mėnesius trukusių didelių gaisrų, bimodalinio dalelių pasiskirstymo maksimumas buvo ties 0,1-0,15 μm (paklotės degimas) ir 3-5 μm (viršutinis gaisras) [59]. ¹³⁷Cs aktyvumo koncentracijos ore sumažėja eile nutolus 2-2,5 km nuo gaisro židinio [60].

Dideliems miškų gaisrams būdingas galingų konvekcinių debesų susidarymas virš gaisro židinių. Dalelių koncentracija tokiuose debesyse yra gana didelė, apie 10⁴-10⁶ m⁻³. Tokių debesų apatinė riba yra 2-5 km aukštyje, o viršutinė gali siekti net tropopaužę (9-11 km). Manoma, kad galingos konvekcinių debesų sistemos kaip tik ir atsakingos už radionuklidų tolimąjį pernašą nuo gaisro židinių [61]. Naujausiose publikacijose skelbiama aerolio dalelių pernaša iš degančių Amazonės upės baseino miškų net iki Pietų Afrikos [62]. Registruoti atvejai, kai Černobylio AE avarijos užterštose teritorijose didelių gaisrų metu susidariusios aerolio dalelės, radionuklidų nešėjos, buvo aptiktos Lietuvoje [63].

Pastaruoju metu akcentuojamas dar vienas radionuklidų išlaisvinimo iš biomasės procesas – radionuklidais užterštos medienos kaip kuro deginimas. Priešingai nei miškų gaisrai, kurie priskiriami prie ypatingų įvykių, radionuklidais užterštos medienos deginimas yra nuolatinis radionuklidų emisijos šaltinis į orą per

visą šildymo sezoną, kuris Rytų Europos regione trunka iki pusmečio. Vien Baltarusijoje 80 tūkst. namų ūkių šildymui kasmet sunaudoja 550 t malkų, neįskaitant apie 600 malkomis kūrenamų katilinių [64].

Miškų gaisro metu iš dujinės fazės susidaro submikroninio dydžio aerolio dalelės. Pažemio oro aerolio bandiniuose, surinktuose po miškų gaisrų avarijos Černobylio AE užterštose teritorijose ^{137}Cs dalis aerolio dalelių vandenyje tirpioje frakcijoje siekė 60 % [65].

Sistemoje "dirvožemis – augalas" ^{137}Cs kaupiasi pagrindinai augalų antžeminėse dalyse, kurioms atmirus ir džiūstant, susidaro aerolio dalelės. Augalinės kilmės aerolio dalelės nuolat papildo atmosferos aerolio išteklius ir sudaro apie 30 % visų atmosferinių dalelių kiekio. Be to, tyrimai po Černobylio AE avarijos užterštose teritorijose parodė, kad pavasarį ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore koreliuoja su spygliuočių žiedadulkių kiekiu pažemio ore [66]. Radionuklido akumuliacija žiedadulkėse susijusi su kalio pavadavimu ceziu biocheminėse reakcijose. 1 m² pušyne žydėjimo sezono metu susidaro apie 1,5 x 10⁹ žiedadulkių, kurios tuo metu sudaro iki 95 % visų dalelių pažemio ore. Užterštame pušyne ^{137}Cs emisija su žiedadulkėmis siekia 360 Bq m⁻² metai⁻¹ [53]. Su stambiomis žiedadulkėmis, kurios siekia iki 50 μm, radionuklidai pernešami pažemio ore lokaliu masteliu [67].

1.6 Dirbtinių radionuklidų išlėkos į atmosferą iš Ignalinos AE

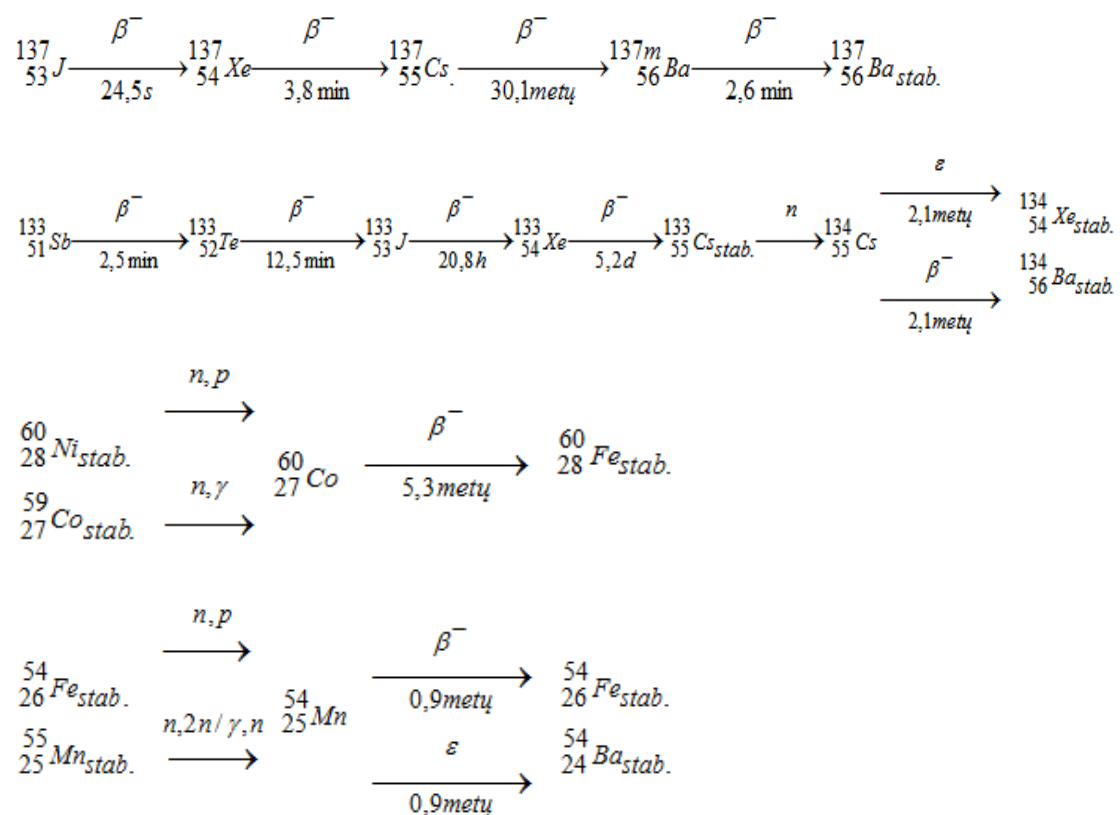
Ignalinos atominėje elektrinėje (Ignalinos AE) yra du 1500 MW elektrinės galios (4800 MW šiluminės galios) šiluminių neutronų vandens-grafito kanaliniai RBMK tipo reaktoriai. Pirmo bloko reaktorius buvo pradėtas eksploatuoti 1983.12.31, o antrasis – 1987.08.31. Pirmo bloko reaktorius sustabdytas 2004.12.31, o antrą numatoma sustabdyti 2009.12.31.

RBMK reaktoriaus, veikiančio vieno kontūro principu, ypatumas tas, kad dalis dalijimosi produktų [68, 69] ir dalis korozinių radionuklidų [70, 71], įveikia garo ir vandens ribą garo separatoriuje ir po turbinų kondensatoriaus su ežektorinėmis dujomis patenka į ventiliacinę sistemą.

Turbinos įėjimo slėgis yra 6,5 MPa, temperatūra 280 °C. Maksimalus vandens ir garo srautas yra 2100 kg s⁻¹ reaktoriui veikiant 4200 MW šiluminiu pajėgumu.

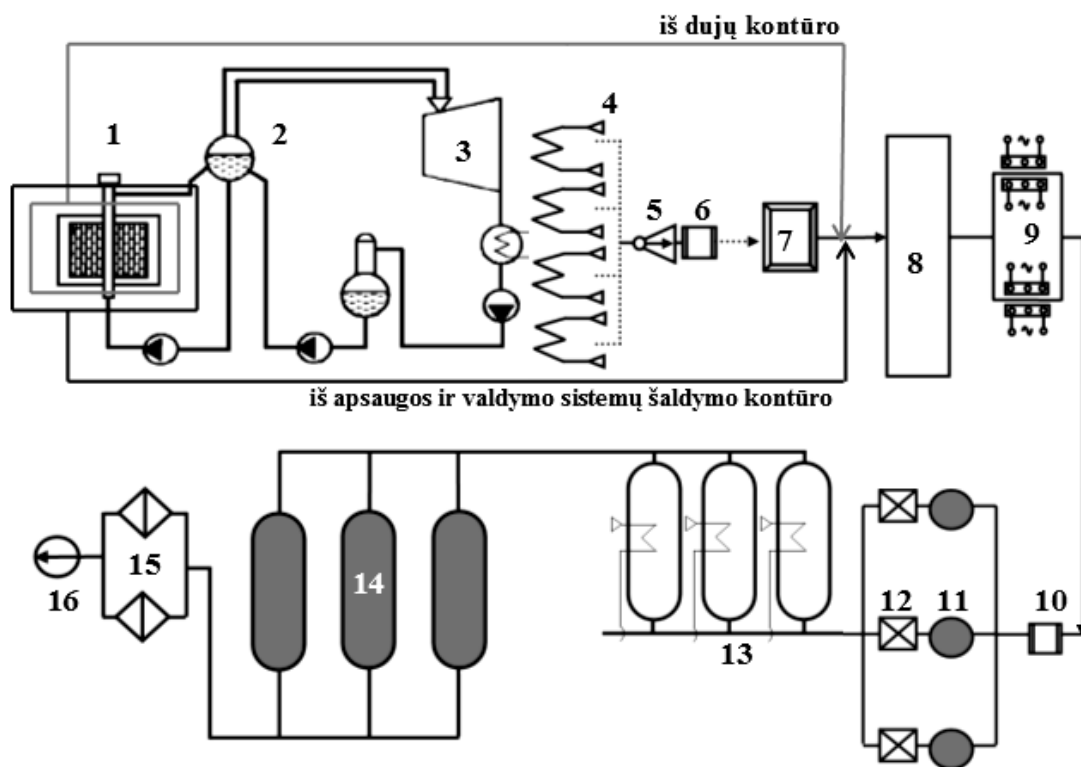
Vandens kondensatoriuje garų ir dujų srautas aušinamas Drūkšių ežero vandeniu nuo 255-265 °C iki 5-15 °C žiemą ir 15-33 °C vasarą temperatūros, išlaikant slėgį, atitinkantį persotintų vandens garų slėgį. Soties garų slėgis kondensatoriuje tokiu atveju susidaro 0,0033 - 0,006 MPa, garo srautas apie 111 kg s⁻¹. Vandenyje po kondensacijos esant didelėms jonizuojančiosios spinduliuotės dozėms atsiranda dujinių priemaišų - vandenilio, angliarūgštės, azoto, amoniako, inertinių dujų, kietųjų dalelių ir druskų [72, 73]. Dujų atskyrimas nuo vandens vyksta turbinų kondensatoriuose ir ežektoriuose. Dujų ir aerolio dalelių mišinys patenka į ventiliacinės sistemos įrenginius. Tai yra ypač svarbus procesas, kadangi čia susidaro palankios sąlygos aerolio dalelių formavimuisi. Šiame fizikiniame cheminiame procese (vandens garinimas ir kondensacija) radionuklidų patekimą į aplinką lemia jų pirmtakų ir skilimo produktų savybės.

Žemiau pavaizduotos kai kurių dalijimosi produktų (¹³⁷Cs ir ¹³⁴Cs) ir korozinių radionuklidų (⁶⁰Co ir ⁵⁴Mn) susidarymo ir skilimo grandinės. Šių radionuklidų gama spinduliavimas registruojamas kaip Ignalinos AE ventiliacinės sistemos ore, taip ir pažemio ore Ignalinos AE poveikio zonoje.



Pateiktos grandinės gali paaikinti ilgaamžių radionuklidų kelią branduolinio reaktoriaus aušinimo ir ventiliacinėje sistemoje.

Supaprastinta Ignalinos AE branduolinio reaktoriaus aušinimo ir ventiliacinės sistemos normalios eksploatacijos režime schema pavaizduota 9 pav. [73-75].



9 pav. Supaprastinta Ignalinos AE branduolinio reaktoriaus aušinimo ir ventiliacinės sistemos normalios eksploatacijos režime schema. 1 - branduolinio reaktoriaus technologiniai kanalai, 2 - būgnas-separatorius, 3 - turbina, 4 - turbinų kondensatoriai, 5 - ežektorius, 6 - kondensatorius, 7 - degaus mišinio deginimo įrenginys, 8 - išlaikymo kamera, 9 - elektrokalfiferis, 10 - šildytuvas ir kondensatorius, 11- filtras aerolio dalelių sulaikymui, 12 – aktyvuotos anglies adsorberis, 13 - ceolito adsorberiai, 14 – aktyvuotos anglies adsorberiai, 15 - filtrai, 16 - ventiliacinis kaminas. Šaltiniai: Kaliačka, 1998; IAE, 2000.

RBMK reaktoriaus priverstinės cirkuliacijos kontūre iki 85 % korozinių radionuklidų yra sukibę su smulkiomis koloidinėmis dalelėmis ($< 1 \mu\text{m}$), likusi radionuklidų dalis yra joninėje formoje. Dujinius pirmtakus turintys dalijimosi produktai, atvirkščiai, šilumnešyje yra daugiausiai joninėje formoje (apie 80 %), o likusi dalis yra sukibusi su koloidinėmis dalelėmis.

Būgnuose-separatoriuose vandens ir garo fazių sąlyčio riboje beveik visi dujiniai radionuklidai ir dalis joninėje formoje esančių radionuklidų pereina iš šilumnešio į garą. Tai įvyksta dėl skirtumų tarp radionuklido pasiskirstymo vandenyje

ir gare, radionuklido nešėjų išnešimo su garo lašeliais ir kitų fizikinių ir cheminių procesų. Santykis tarp Kr izotopų aktyvumo gare ir vandenyje yra apie $6,0 \pm 1,0$. Joniniams dalijimosi produktams šis santykis ženkliai mažesnis: $^{137}\text{Cs} - 5,3 \times 10^{-3}$, $^{134}\text{Cs} - 4,5 \times 10^{-3}$. Koloidinės dalelės beveik visos lieka šilumnešyje [76].

Iš turbinų kondensatorių radionuklidai išsiurbiami ežektoriais ir patenka į ventiliacinę sistemą. Ten pat periodiškai patenka radionuklidai iš reaktoriaus dujų kontūro ir saugos bei valdymo sistemų šaldymo kontūro. Toliau degaus mišinio deginimo įrenginyje sudeginami garo radiolizės metu susidaręs vandenilis ir deguonis. 6000 m^3 tūrio betoninėje kameroje radionuklidai išlaikomi apie 10 val. Kameroje vyksta inertinių dujų radionuklidų skilimas, dukterinių radionuklidų susidarymas ir koaguliacija, atsirandant smulkioms aerozolio dalelėms ($0,4-0,7 \mu\text{m}$). Dalis iš dujinių pirmtakių susidariusių radionuklidų nusėda ant pluoštinių filtrų filtravimo stotyje, įrengtoje po kameros. Pagrindinė inertinių dujų radionuklidų dalis prieš išmetimą per ventiliacinį kaminą užlaikoma iki 20 val. ceolitu ir aktyvuota anglimi užpildytuose absorberiuose ir čia suskyla [77].

Per atominės elektrinės aukštuminį ventiliacinį kaminą radionuklidai išlekia į orą, turbulentiniais oro srautais išsklaidomi atmosferos pažemio oro sluoksnyje, kad radionuklidų koncentracijos atominių elektrinių poveikio zonos ore neviršytų didžiausių leistinų koncentracijų [78, 79]. Radionuklidų išlėkų efektyvus aukštis per 150 m aukščio ventiliacinį kaminą vasarą anticikloniniu orų sąlygomis gali siekti 300 m, o žiemą inversijos sąlygomis – 170 m [80].

Ignalinos atominės elektrinės pramoninėje aikštelėje be radionuklidų patekimo per aukštuminius ventiliacinius kaminus yra ir kiti radionuklidų emisijos šaltiniai į atmosferą. 6 lentelėje pateikiami išlėkų debitai ir ^{60}Co emisija iš visų galimų Ignalinos AE emisijos šaltinių 2000 metais [81].

6 lentelė. ^{60}Co emisija iš IAE emisijos šaltinių 2000 m. Šaltinis: IAE, 2000.

| Pastatas / ventiliacinio kamino aukštis, m | Išlėkų debitas, $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ | ^{60}Co emisija, kBq |
|--|---|----------------------------------|
| Pagrindinis pastatas, 150 m | 2 900 | 470 000 |
| Skystųjų radioaktyviųjų atliekų tvarkymo kompleksas, 75 m | 300 | 195 |
| Centralizuoto remonto cechasis, stogas | 165 | 165 |
| Specialaus transporto deaktyvavimo pastatas, stogas | 30 | 45 |
| Skalbykla, stogas | 10 | 5 |
| Kietųjų radioaktyviųjų atliekų saugykla, stogas | 10 | nėra duomenų |

Kaip matyti 6 lentelėje, Ignalinos AE branduolinių reaktorių ventiliaciniai kaminai yra pagrindinis radionuklidų emisijos šaltinis į atmosferą.

7 lentelėje pateikti duomenys apie aerosolinių radionuklidų aktyvumus Ignalinos AE išlėkose per ventiliacinius kaminus 1985-2006 metais [82, 83]. Paskutinėje lentelės eilutėje pateikti Ignalinos AE išlėkų ribiniai aktyvumai (pagal LAND 42-2001) [84].

7 lentelė. Radionuklidų aktyvumai Ignalinos AE išlėkose per ventiliacinius kaminus 1985-2006 metais. Šaltiniai: Gusev, 1993; IAE, 2007.

| Metai | Radionuklidų aktyvumas, MBq | | | | | | |
|--------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | Viso* | ⁶⁰ Co | ¹³⁷ Cs | ⁵⁴ Mn | ¹³¹ I | ⁹⁰ Sr | ¹³⁴ Cs |
| 1985 | 38000 | – | – | – | – | – | – |
| 1986 | 8780 | – | – | – | – | – | – |
| 1987 | 3330 | 101 | 496 | 201 | – | 44 | 215 |
| 1988 | 3550 | 152 | 940 | 311 | – | 78 | 673 |
| 1989 | 1740 | – | – | – | – | – | – |
| 1990 | 980 | – | – | – | – | – | – |
| 1991 | 9730 | 4480 | 984 | 710 | 262 | 5 | 72 |
| 1992 | 2020 | 361 | 351 | 104 | 44 | 14 | 15 |
| 1993 | 1310 | 289 | 263 | 189 | 11 | 10 | 15 |
| 1994 | 5520 | 1290 | 191 | 245 | 136 | 10 | 83 |
| 1995 | 3850 | 2130 | 529 | 457 | 124 | 15 | 10 |
| 1996 | 1560 | 1050 | 91 | 39 | 73 | 11 | 21 |
| 1997 | 1150 | 420 | 221 | 238 | 36 | 10 | 8 |
| 1998 | 766 | 205 | 99 | 60 | 37 | 50 | 2 |
| 1999 | 643 | 233 | 80 | 156 | 2 | 41 | 1 |
| 2000 | 1200 | 468 | 132 | 312 | 2 | 45 | 1 |
| 2001 | 1050 | 299 | 177 | 179 | 17 | 42 | 2 |
| 2002 | 701 | 192 | 117 | 95 | 67 | 59 | 3 |
| 2003 | 803 | 226 | 93 | 143 | 14 | 45 | 15 |
| 2004 | 842 | 232 | 66 | 109 | 28 | 60 | 13 |
| 2005 | 559 | 103 | 127 | 33 | 5 | 56 | 1 |
| 2006 | 691 | 102 | 102 | 56 | 124 | 59 | 2 |
| LAND 42-2001 | $1,8 \times 10^6$ | $8,3 \times 10^5$ | $3,1 \times 10^7$ | $1,8 \times 10^6$ | $1,4 \times 10^6$ | $1,2 \times 10^6$ | |

* išskyrus inertinių dujų radionuklidus; – duomenų nėra

Kaip matyti 7 lentelėje, radionuklidų aktyvumai išlėkose yra 10^4 - 10^6 kartų mažesni nei jų ribiniai aktyvumai. Kasmet stebima radionuklidų aktyvumo išlėkose mažėjimo tendencija.

Prognozuojama, kad eksploatuojant Ignalinos AE naują kietųjų atliekų tvarkymo ir saugojimo kompleksą didžiausia metinė ⁶⁰Co emisija į atmosferą sieks iki

$3,4 \times 10^8$ Bq, o ^{137}Cs – iki $2,0 \times 10^6$ Bq [85]. 8 lentelėje pateikiama radionuklidų emisija į atmosferą panaudoto branduolinio kuro perkrovimo iš Ignalinos AE išlaikymo baseinų į CONSTOR konteinerius metu atskiruose etapuose [86, 87].

8 lentelė. ^3H , ^{134}Cs , ^{137}Cs emisija į atmosferą panaudoto branduolinio kuro perkrovimo iš Ignalinos AE išlaikymo baseinų į CONSTOR konteinerius metu.
Šaltinis: Nukem, 2006.

| Etapas | Radionuklidų aktyvumas, Bq | | |
|--|----------------------------|-------------------|-------------------|
| | ^3H | ^{134}Cs | ^{137}Cs |
| Sandarių panaudoto kuro rinklių perkrovimas AE blokuose | $6,9 \times 10^9$ | $4,4 \times 10^5$ | $1,9 \times 10^6$ |
| Nesandarių panaudoto kuro rinklių perkrovimas AE blokuose | $3,8 \times 10^{12}$ | $2,4 \times 10^8$ | $1,0 \times 10^9$ |
| Mechaniškai pažeistų ir eksperimentinių panaudoto kuro rinklių perkrovimas AE blokuose | $7,7 \times 10^{11}$ | $3,8 \times 10^5$ | $1,8 \times 10^6$ |
| Panaudoto kuro rinklių perkrovimas B1 pastato „karštoje“ kameroje | $1,0 \times 10^{11}$ | $6,6 \times 10^5$ | $2,9 \times 10^6$ |
| Viso: | $4,7 \times 10^{12}$ | $2,4 \times 10^8$ | $1,0 \times 10^9$ |

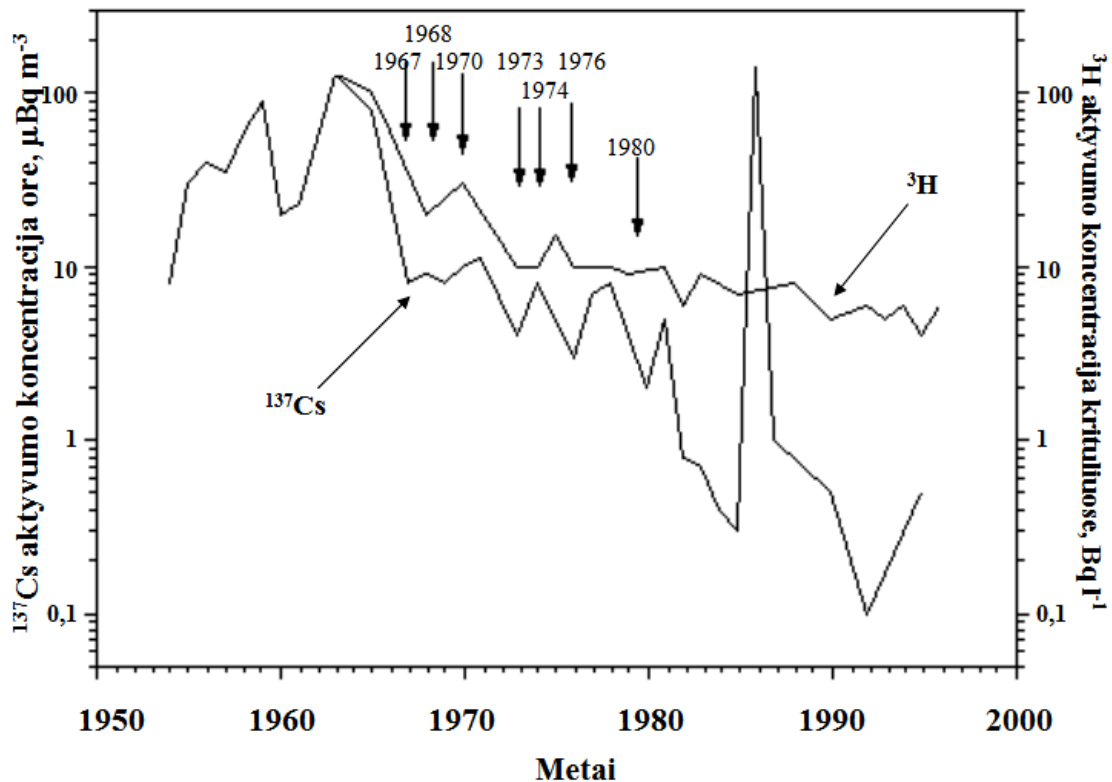
Iki 2010 metų Ignalinos AE bus sukaupta apie 30 tonų panaudotų pluoštinių filtrų (be rėmų). Vidutinė ^{60}Co aktyvumo koncentracija filtruose siekia 380 kBq kg^{-1} , ^{137}Cs – 160 kBq kg^{-1} . Atlikus panaudotų filtrų tvarkymo studiją nuspręsta atsisakyti jų deginimo ir pasirinkta technologija laidoti filtras paviršiniuose kapinynuose šalia Ignalinos AE [88]. Šiuolaikinės inžinierinės priemonės, kad ir kokios pažangios jos būtų, nesulaiko radionuklidų patekimo iš kapinynuose palaidotų radioaktyviųjų atliekų pakuočių į aplinką.

1.7 ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore eigos analizė

Nuolatiniai radionuklidų aktyvumo koncentracijų ore matavimai vykdomi pasauliniame Branduolinio ginklo neplatavimo sutarties organizacijos sukurtame pasauliniame radionuklidų stebėsenos aplinkoje tinkle, duomenys saugomi ir analizuojami duomenų apdorojimo centruose [20, 89]. Daugelyje išsivysčiusių šalių sukurtos nacionalinės laboratorijos, vykdančios analogiškus matavimus. Praktiškai visų atominių elektrinių aplinkoje veikia žinybinės laboratorijos, turinčios stacionarius stebėjimo postus. Apibendrinti matavimų rezultatai pateikiami

mokslinėse konferencijose ir publikacijose. Kaip taisyklė, ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore eiga skiriama daugiausiai dėmesio.

10 pav. pateikiamos vidutinės metinės ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore ir ^3H aktyvumo koncentracijos krituluose, suvidurkintos TSRS (po 1991 metų Rusijos Federacijos) teritorijai 1954-1995 metais eiga [90].



10 pav. Vidutinės metinės ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore ir ^3H aktyvumo koncentracijos krituluose, suvidurkintos TSRS (po 1991 metų Rusijos Federacijos) teritorijai 1954-1995 metais eiga. Šaltinis: Makhonko, 2001.

10 pav. nurodyti metai, kai Kinijos Liaudies Respublika vykdė branduolinio ginklo sprogdinimus atmosferoje (vertikalios rodyklės). Kaip matyti, 1963-1981 metais ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore koreliuoja su ^{137}Cs patekimu į atmosferą branduolinio ginklo bandymų atmosferoje Šiaurės pusrutulyje laikotarpiu. ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore padidėjimas 1986 metais siejamas su radionuklido patekimu į atmosferą įvykus avarijai Černobylio AE. Kaip matyti, nepertraukiami radionuklidų aktyvumo koncentracijų ore matavimai atspindi visų reikšmingų radionuklido patekimo į aplinką įvykių istoriją.

Radionuklido aktyvumo koncentracijų ore ir iškritose eiga buvo bandoma aprašyti matematiškai, aproksimuojant eksperimentinius rezultatus eksponentine

lygtimi ir skaičiuojant radionuklido aktyvumo koncentracijų pažemio ore mažėjimo pusiau trukmes ($T_{1/2}$):

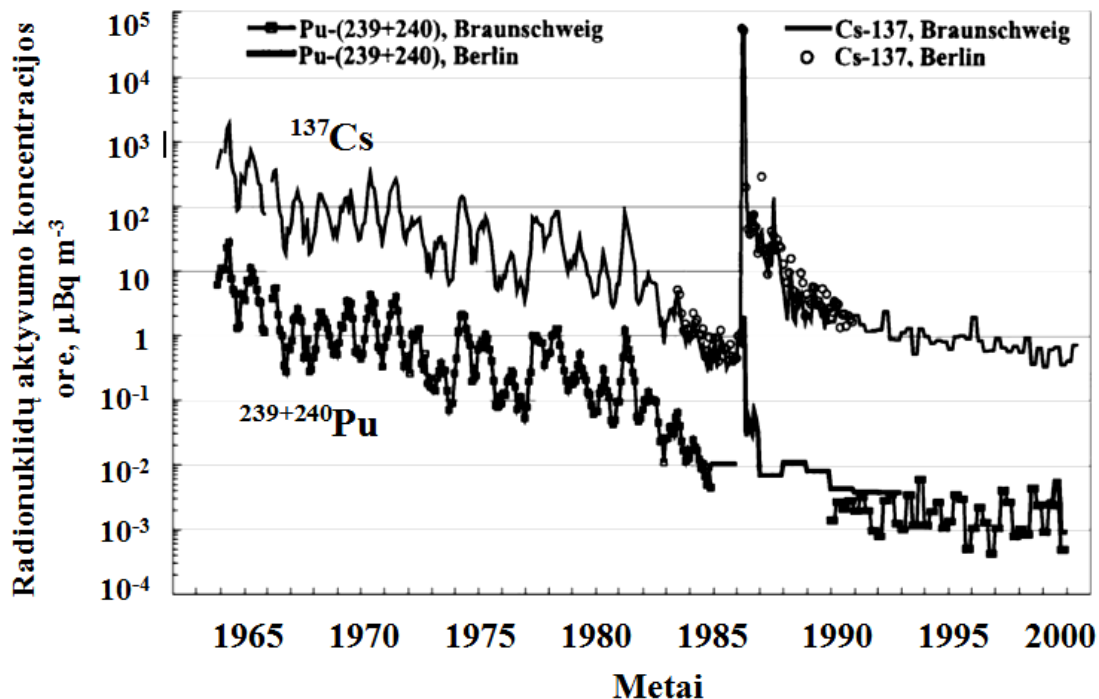
$$C = C_0 e^{-\frac{\ln 2(t-t_0)}{T_{1/2}}}, \quad (1)$$

čia C_0 ir C – radionuklido aktyvumo koncentracijos pažemio ore pradiniu laiko momentu t_0 ir po laiko t , atitinkamai, $T_{1/2}$ – radionuklido aktyvumo koncentracijų pažemio ore mažėjimo pusiau trukmė.

Įvertinta, kad patekusio į stratosferą ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore mažėjimo pusiau trukmė yra apie 1-2 metai, o ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos troposferoje mažėjimo pusiau trukmė yra apie 1 mėnesį [91].

Vidutinių ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore matavimų Katowice 1990-1999 metais matavimų rezultatai pateikti darbe [92]. Graikijoje 1987-1992 metų laikotarpyje vykdytų ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų pažemio ore eiga aprašoma eksponentine funkcija su radionuklido pašalinimo pusamžiu 1,33 metų [93].

Preciziškų, ilgamečių, nuo 1962 iki 2001 metų, vidutinių ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore matavimų Šiaurės Vokietijoje istoriniai rezultatai pateikti darbe [94] (11 pav.).



11 pav. ^{137}Cs ir $^{239+240}\text{Pu}$ aktyvumo koncentracijos ore Šiaurės Vokietijoje 1962-2000 metais. Šaltinis: Wershofen, 2001.

Skirtingose geofizinėse stotyse gaunami skirtingi ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore mažėjimo pusiau trukmės rezultatai, kas susiję su skirtingais stebėjimų laikotarpiais ir stočių nuotoliu nuo ^{137}Cs šaltinių [95, 96].

Praėjus daugeliui metų po branduolinio ginklo bandymų atmosferoje ir virš 20 metų po avarijos Černobylio AE iki šiol ir, tikriausiai, dar ilgą laiką ^{137}Cs išlieka vienu radiologiškai svarbių dirbtinių radionuklidų, nuolat registruojamų viso pasaulio oro monitoringo stotyse.

2. Tirpios aerolio dalelės atmosferoje

Atmosferoje ^{137}Cs ir kiti radionuklidai yra prisijungę prie aerolio dalelių ir kartų su jomis dalyvauja atmosferos cirkuliacijos ir savivalos procesuose. Radionuklidų elgsena aplinkoje priklauso nuo aerolio dalelių, radionuklidų nešėjų, fizikinių ir cheminių savybių.

Darbe [25] pateikiamos skirtingų pagal prigimtį aerolio dalelių charakteristikos ir aerolio dalelių masės kiekiai tirpioje frakcijoje (9 lentelė).

9 lentelė. Skirtingų pagal prigimtį aerolio dalelių charakteristikos. N – aerolio dalelių skaitinė koncentracija (cm^{-3}), ε – aerolio dalelių masės procentas tirpioje frakcijoje (%). Šaltinis: Raes et al., 2000.

| Charakteristika | | Jūrinės oro masės | Užterštos kontinentinės oro masės |
|---|---------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Aerolio dalelių Aitkeno moda | N, cm^{-3} | 300 | 2800 |
| Aerolio dalelių akumuliacinė moda | N, cm^{-3} | 70 | 350 |
| Aerolio dalelių masės procentas tirpioje frakcijoje | $\varepsilon, \%$ | 100 | 28 |

Tipinio kontinentinio užterštumo sąlygomis aerolio dalelėse vidutinis aerolio dalelių masės kiekis tirpioje frakcijoje yra 28%. Švarioje jūrinėje oro masėje vidutinis aerolio dalelių masės kiekis tirpioje frakcijoje yra 100% [97, 98]. Kaip matyti iš lentelės, kontinentinėse ir jūrinėse oro masėse visuomet stebima tirpių aerolio dalelių frakcija.

Vandenyje tirpios dalelės gaminasi aerolio dalelių susidarymo ir augimo epizoduose [99]. Pastarieji procesai vyksta dalyvaujant atmosferos vandens

molekulėms, kurios dėl elektrinio krūvio dipoliškumo sukuria stiprių paviršinio įtempimo jėgų laikomas stabilias vandens molekulių ir priemaišų struktūras (miceles, arba aerozolio daleles). Kai kurios priemaišos (pvz., metalų nitratai, sulfatai, chloridai) gerai absorbuoja vandens molekules ir persotintų vandens garų sąlygomis gali augti toliau. Tokios 0,1 μm dydžio dalelės yra ir debesų kondensacijos centrai. Palankiomis debesų susidarymo sąlygomis šios dalelės išauga iki 2 mm ir daugiau dydžio lietaus lašų. Nustatyta, kad kuo labiau aerozolio dalelės yra higroskopiškos, tuo lengviau jos išplaunamos iš oro krituliais [100].

Aerozolio dalelių pasiskirstymas tarp tirpios ir netirpios frakcijų nustatomas jūros ir miesto kontinentinėse oro masėse [98]. Aerozolio dalelių pasiskirstymas tarp tirpios ir netirpios frakcijų nustatomas tirpinant vandeniu ant filtro surinktas aerozolio daleles. Darbe [17] „karštų“ „Černobylinių“ dalelių tirpios frakcijos nustatymui buvo naudojamas trijų filtrų paketas. Darbuose [101, 102] aerozolio dalelių pasiskirstymo tirpioje ir netirpioje frakcijose nustatymui naudota Tessier pakopinės ekstrakcijos metodika. Darbe [103] filtrais surinktos organinės anglies dalelės buvo tirpinamos vandeniu, ir tirpių dalelių frakcija buvo nustatoma cheminiais metodais.

Aerozolio bandiniuose, surinktuose Ignalinos AE veikiančio reaktoriaus ventiliaciniame kamine 1999-2001 metais, ^{137}Cs , ^{60}Co ir ^{54}Mn dalis vandenyje tirpioje frakcijoje buvo 78 %, 99 % ir 100 %, atitinkamai. Tuo pačiu laiku Ignalinos AE regione FI stotyje surinktuose pažemio oro aerozolio dalelių bandiniuose ^{60}Co ir ^{137}Cs dalis vandenyje tirpioje frakcijoje buvo rasta mažiau – 22 ir 32 %, atitinkamai [16, 104].

2.1 Aerozolio dalelių, radionuklidų nešėjų, tirpumas plaučių skystyje

Sprendžiant radiacinės saugos problemas svarbu žinoti aerozolio dalelių, radionuklidų nešėjų, tirpumą plaučių skystyje. Kasdien su įkvėptu oru į žmogaus plaučius patenka vidutiniškai iki 100 milijardų aerozolio dalelių. Aerozolio dalelių elgsena žmogaus kvėpavimo sistemoje yra atskiros mokslo šakos *inhaliacinės toksikologijos* objektas; kaip ir *radiologijoje*, inhaliaciniai efektai vertinami įvedant dozės sąvoką.

Žmogaus kvėpavimo sistema pasižymi sudėtinga sandara. 10 lentelėje pateikiami aerozolio dalelių nusėdimo greičiai ir buvimo laikai kvėpavimo sistemos atskirose dalyse [105].

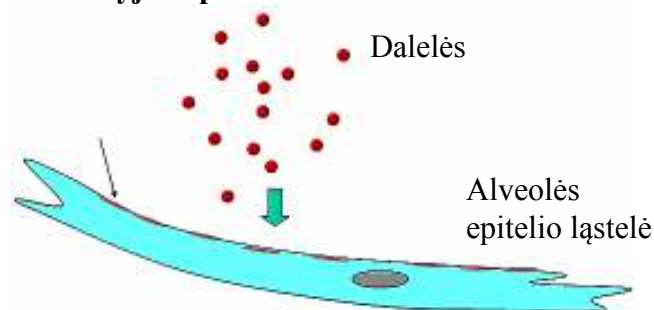
10 lentelė. Aerosolio dalelių nusėdimo greičiai ir buvimo laikai žmogaus kvėpavimo sistemos atskirose dalyse. Šaltinis: Swietlicki, 2006.

| Kvėpavimo sistemos dalis | Kvėpavimo sistemos charakteristikos | | | | Aerosolio dalelių | |
|-----------------------------|-------------------------------------|--------------|-----------|----------------------------|--------------------------------------|-------------------|
| | Atsišakojimų kiekis | Skersmuo, mm | Ilgis, mm | Paviršius, cm ² | nusėdimo greitis, mm s ⁻¹ | buvimo laikas, ms |
| Trachėja | 1 | 18 | 120 | 2,5 | 3900 | 30 |
| Bronchai | 2000 | 1,1 | 3,9 | 20 | 520 | 7,4 |
| Bronchiolė | 66×10 ³ | 0,6 | 1,6 | 180 | 54 | 210 |
| Alveolių sanaupa plaučiuose | 8×10 ⁶ | 0,41 | 0,5 | 72×10 ³ | 0,9 | 550 |

Didesnės nei 10 μm dydžio aerosolio dalelės sulaikomos mikropluošteliais padengtuose viršutiniuose kvėpavimo takuose (trachėja, bronchai) ir kartu su išskyromis palyginus greitai pašalinamos iš kvėpavimo sistemos į skrandžio ir žarnyno sistemą.

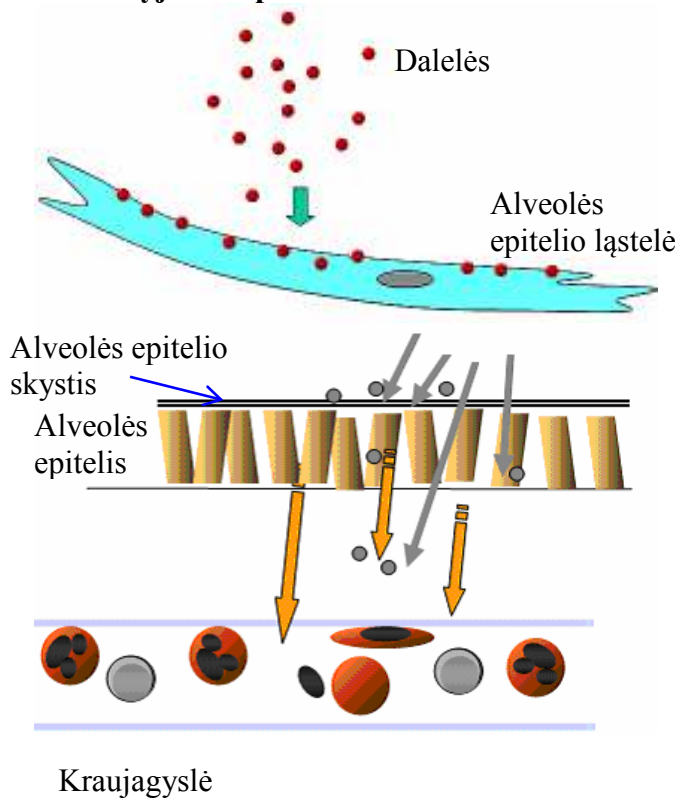
Iki 20 % įkvėptų aerosolio dalelių patenka į gilesnius kvėpavimo takus (bronchiolės, alveolių sanaupos, alveolės). Šiose kvėpavimo sistemos dalyse susidaro vandens garo įsotinimui palankios sąlygos. Nustatyta, kad vandenyje tirpios aerosolio dalelės kelyje iki alveolių padidėja beveik du kartus [106]. Plaučių alveolėse vyksta dujų apykaitos procesai, o bendras alveolių paviršiaus plotas siekia 75 m². Vandenyje tirpių ir netirpių aerosolio dalelių elgsena plaučių alveolėse yra skirtinga, kas lemia skirtingas žmogaus vidinės apšvitos dozes [107]. 12 pav. pateikiama vandenyje tirpių ir netirpių aerosolio dalelių, radionuklidų nešėjų, elgsenos alveolėse iliustracija.

Vandenyje tirpios aerosolio dalelės



Po nusėdimo ant alveolių, aerosolio dalelės sąveikauja su alveolių epitelinėmis ląstelėmis, ištirpsta jų skystyje, o aerosolio dalelėse inkorporuoti radionuklidai išlaisvinami ir difunduoja per ląstelių membranas į kraują. Radiologinis poveikis sveikatai priklauso nuo aerosolio dalelių, radionuklidų nešėjų, kiekio alveolėse, dalelių masės ir cheminės sudėties.

Vandenyje netirpios aerosolio dalelės



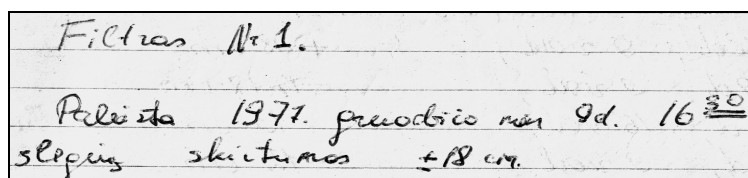
Aerosolio dalelių fizikinės ir cheminės savybės beveik nesikeičia. Dalelės su inkorporuotais radionuklidais difunduoja per alveolių epitelį ir tiesiogiai patenka į kraują. Radiologinis poveikis sveikatai priklauso nuo aerosolio dalelių, radionuklidų nešėjų, kiekio alveolėse ir dalelių paviršinių savybių.

12 pav. Vandenyje tirpių ir netirpių aerosolio dalelių, radionuklidų nešėjų, elgsena alveolėse.

Šiuolaikiniuose inhaliuotų aerosolio dalelių, radionuklidų nešėjų, nusėdimo kvėpavimo takuose modeliuose skaičiuojami radionuklidų perėjimo iš įkvėptų su oru aerosolio dalelių į plaučių skystį koeficientai [108].

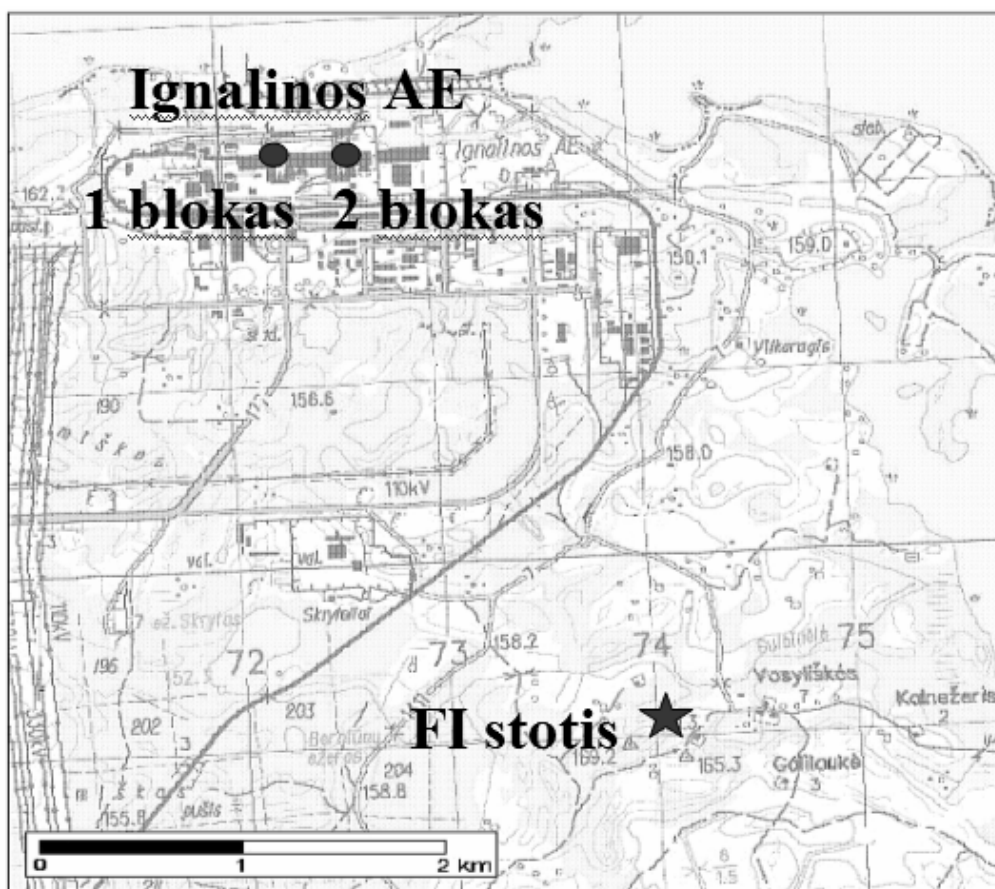
METODIKA

Nuo 1977 metų pabaigos Ignalinos AE poveikio zonoje Fizikos instituto geofizinėje radioekologinio monitoringo stotyje (FI stotis) nepertraukiamai vykdomi radionuklidų aktyvumo koncentracijų pažemio ore ir iškritose matavimai (13 pav.).



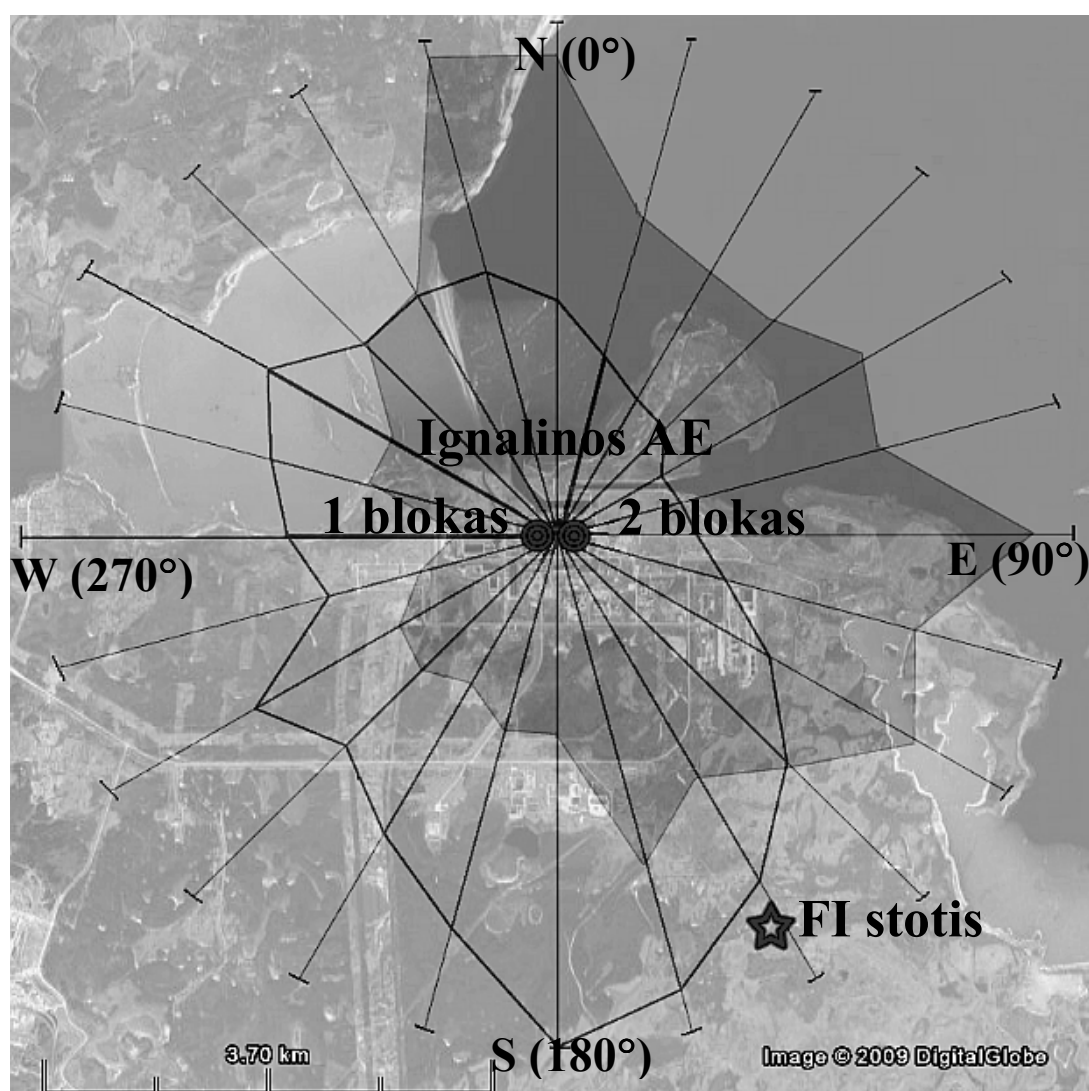
13 pav. Išrašas iš Fizikos instituto radioekologinio monitoringo stoties žurnalo. Užrašyta pirmo pažemio oro aerozolio bandinio ėmimo pradžia 1977.12.09.

FI stotis (N 55°34'03", E 26°35'26") yra 3,5 km į pietryčius nuo Ignalinos AE (14 pav.). Ignalinos AE 1 ir 2 blokų branduolinių reaktorių ventiliacinių kaminų koordinatės N 55°36'18", E 26°33'36" ir N 55°36'18", E 26°33'53", atitinkamai.



14 pav. Ignalinos AE 1 ir 2 blokų bei Fizikos instituto stoties (FI stotis) išsidėstymas vietovės plane.

Kaip žinoma, aerozolio dalelių, radionuklidų nešėjų, koncentracija pažemio ore yra didžiausia 3-8 km atstumu nuo radionuklidų emisijos šaltinio [109]. FI stoties padėtis yra optimali registruojant iš Ignalinos AE 150 m aukščio ventiliacinių kaminų išlėkusių radionuklidų gama spinduliavimą, kai FI stotis yra Ignalinos AE pavėjinėje pusėje. 15 pav. pateikiama vėjų rožė Ignalinos AE regione (Ignalinos AE 30 km stebėjimo zonoje) 2005-2006 metais [83, 110].



15 pav. Vėjų rožė Ignalinos AE regione 2005 metais (kontūras) ir 2006 metais (kontūras pilkame fone). Spindulio ilgis atitinka vėjo krypties pasikartojamumą per metus. Šaltinis: IAE, 2006; IAE, 2007. Nuotrauka: Google Earth, 2009.

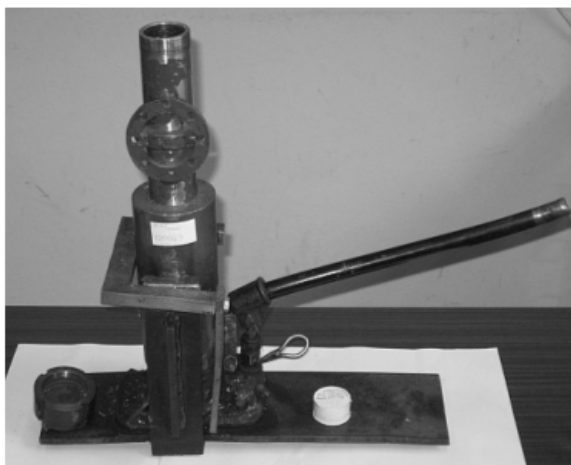
3.1 Pažemio oro aerozolio dalelių bandinių ėmimas

FI stotyje pro $0,9 \text{ m}^2$ ploto smulkiapluoštinių perchlorvinilo Petrianovo FPP-15-1,5 filtrą (Esfiltechno AS) nuolat siurbiamas pažemio oras ir kas savaitę paimami filtro sulaikytų aerozolio dalelių bandiniai (iki 1998 m. bandiniai buvo imami kas 3 dienas). Oro siurbimui naudojamas $1800\text{-}2100 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ našumo aukšto slėgio išcentrinis ventiliatorius БВД-8. Vienam bandiniui paimti prasiurbiamas vidutiniškai $250\ 000 - 300\ 000 \text{ m}^3$ oro. Filtras įrengtas nuo atmosferinių kritulių apsaugotame laikiklyje 1 m aukštyje nuo žemės paviršiaus.

Siurbiant pažemio orą, jame esančios aerozolio dalelės nusėda ant Petrianovo filtro pluoštelių ir prikimba prie jų dėl elektrostatinės traukos ir sąveikos su pluoštelių paviršiumi [111, 112]. Projektinis dalelių prašokimas pro filtrą ne daugiau 0,002-0,007 %, pluoštelių skersmuo $1,5 \mu\text{m}$ [113].

Oro siurbimo debitas nustatomas bandinio ėmimo pradžioje ir pabaigoje pagal slėgio skirtumą prieš ir po diafragmą, kuri įmontuota viduryje 6 m ilgio ir 30 cm skersmens ventiliatorių ir filtro laikiklį jungiančiame vamzdyje. Eksperimentiškai įvertinta oro debito priklausomybė nuo siurbimo laiko įvairioms oro ir filtro užterštumo sąlygoms. Oro debito santykinė paklaida neviršija 10 %.

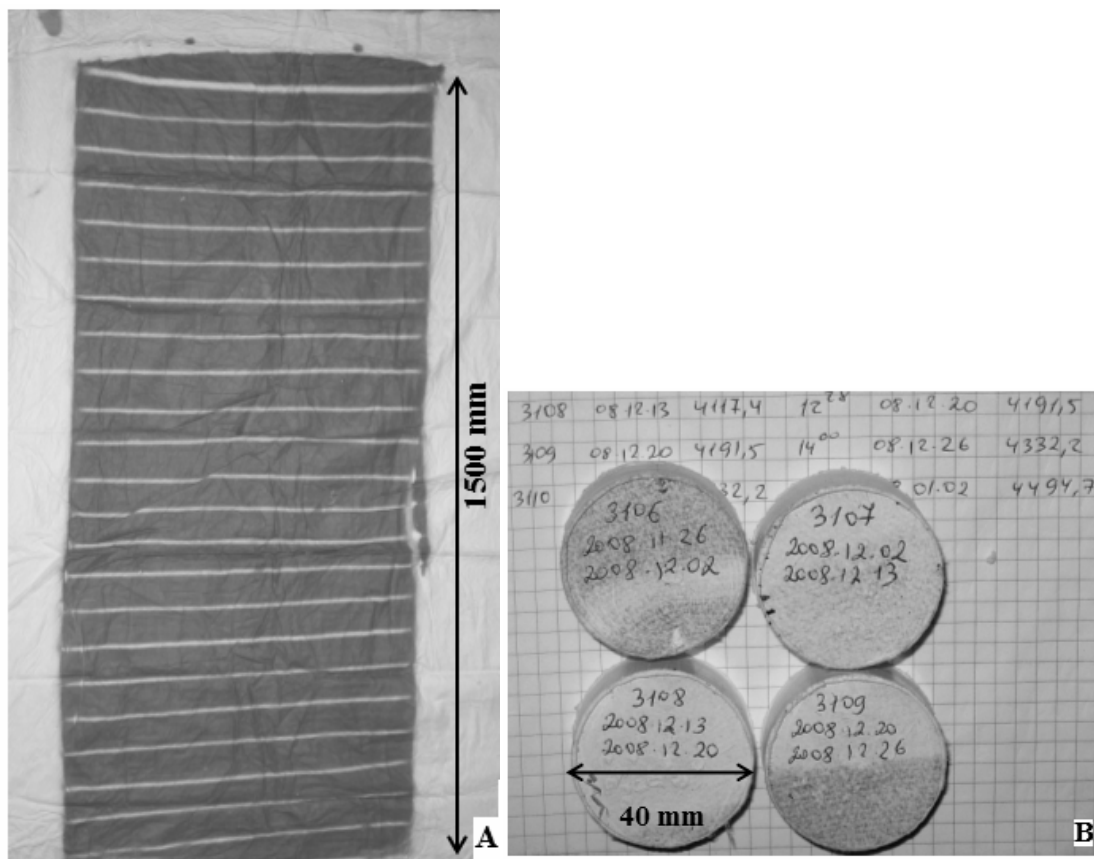
Paimti bandiniai registruojami darbo sąsiuvinyje, supakuojami ir transportuojami į Fizikos instituto laboratoriją Vilniuje. Visi bandiniai dar kartą registruojami „Bandinių, atvežtų iš Ignalinos radioekologinio monitoringo stoties (Ignalinos r. Vosyliškių k.) į Fizikos institutą (Vilnius), registracijos žurnale“, laikomi



kataloginėje spintoje kambario temperatūroje.

Eksponuoto filtro pluošteliai atskiriami nuo marlės padėklo ir presuojami 5 tonų hidrauliniu kėlikliu DG-5 (16 pav.) į cilindro formos tabletę (skersmuo $D=40 \text{ mm}$, aukštis 15-30 mm, medžiagos tankis $\rho = 0,9 \pm 0,1 \text{ g cm}^{-3}$) (17 pav.).

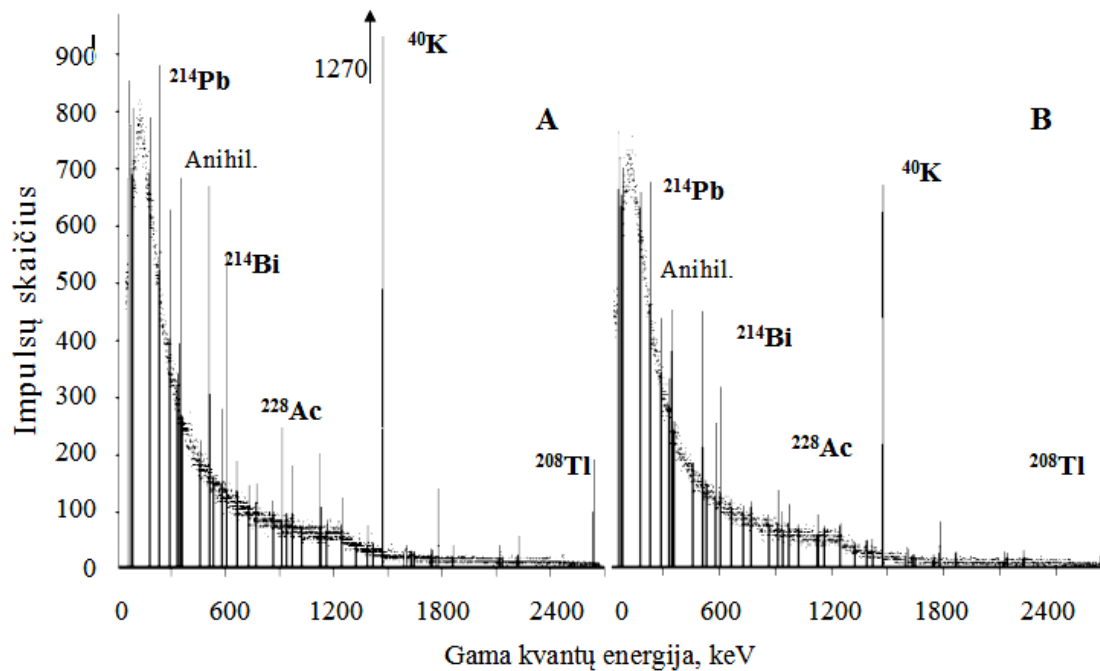
16 pav. Hidraulinis kėliklis DG-5, skirtas suspausti Petrianovo filtrą į kompaktišką tabletę.



17 pav. Pažemio oro aerozolio dalelių bandinys, surinktas ant Petrianovo filtro (A), ir suspausta cilindro formos tabletė (B).

Radionuklidų aktyvumai bandiniuose išmatuojami gama spektrometriniu metodu [114], naudojant ORTEC gama spektrometrinę sistemą su gryno germanio detektoriumi GEM-30180-P-S (santykinis gama kvantų registravimo efektyvumas 30 %, energetinė skyra 1,9 keV / 1,33 MeV) su Gamma Gage tipo integruotu Diuaro indu. Suspaustas bandinys pritvirtinamas laikiklyje ir talpinamas mažo fono apsaugoje arti detektoriaus. Bandinio energetinis gama spektras išmatuojamas SNIP (Silena International S.p.A) daugiakanaliu analizatoriumi (4096 kanalų) [115].

Siekiant sumažinti foninių impulsų registravimo spartą energetiniame gama spektre, naudota daugiasluoksninė apsauga, susidedanti iš švino blokų (sienelės storis 100 mm), vario (1 mm) ir Cd (1 mm) lakštų ir gyvsidabriu užpildyto hermetiško indo-cilindro (sienelės storis 25 mm). 18 pav. pateikti foniniai gama spektrai be apsaugos ir su apsauga.



18 pav. Foniniai energetiniai gama spektrai be apsaugos (A) ir su apsauga (B). Matavimo trukmė 85000 s. Matavimo vieta – Fizikos institutas, Vilnius (165 m virš jūros lygio).

Foniniame gama spinduliuotės spektre matavimo patalpos ore esantys gamtiniai ^{226}Ra (^{214}Pb , ^{214}Bi) ir ^{232}Th skilimo produktai (^{228}Ac , ^{212}Bi , ^{212}Pb , ^{208}Tl), ^{40}K ir elektronų-pozitronų anihiliacijos metu išspinduliuojami gama kvantai. Naudojant apsaugą, foninių impulsų registravimo spartą pavyksta sumažinti beveik du kartus.

Daugiakanalio analizatoriaus skalė kalibruojama naudojant ^{137}Cs (661,7 keV), ^{60}Co (1173,2 ir 1332,5 keV) ir ^{152}Eu taškinius OSGI tipo pamatinius šaltinius. Periodiškai energetinis kalibravimas tikslinamas pagal foninius energetinius gama spektrus. Šiuo tikslu energetiniame gama spektre parenkamos bene ryškiausios smailės: 609,3 keV (^{214}Bi), 911,2 keV (^{228}Ac), 1460,8 keV (^{40}K), 1764,5 keV (^{214}Bi), 2614,5 keV (^{208}Tl). Periodiškai atliekama gama spektrometro patikra, naudojant etaloninius jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinius (19 pav.).

| | |
|---|--|
| Valstybės įmonė Vilniaus metrologijos centras S. Dariaus ir S. Gireno 23 2038 Vilnius Tel. 306276 | VALSTYBINĖ METROLOGIJOS TARNYBA |
| PATIKROS LIUDIJIMAS | |
| Nr. | 0599281 |
| Data | 2005-07-19 |
| Puslapių skaičius | 1 |
| MP pavadinimas, tipas, Nr., γ -Spektrometras GEM-30180-P-S №38- matavimo ribos, tikslumas | TP11392B |
| MP savininko pavadinimas ir kodas arba adresas | Į.k. 111954455 Fizikos institutas |
| Patikros metodo žymuo | PM 27451-87: MI-3/86: MP techninė dokumentacija |
| Naudotos etaloninės pavadinimas, tipas, Nr. | Etaloniniai spec. γ -šaltiniai Cs-137 Nr.2791; K-40 Nr.2792; Cs-137 Nr.20003-628042; Am-241 Nr.08042002-856002; Ca-60 Nr.17102002- 850014 |
| Patikros protokolo registracijos Nr., data | Protokolas Nr. 183 2005-07-19 |
| Matavimo priemonė patikrinta (laboratorijos pavadinimas) | DRML |
| Išvada | Atitinka tipo reikalavimus |
| Patikros liudijimas galioja iki | 2006-07-19 (data) |
| Metrologus | Technikas metrologas Gintautas Kandrovis <i>Gauz</i> (vardas, pavardė, parašas) |
| Laboratorijos vadovas | Laboratorijos vedėja Lidija Safonova <i>Lidija Safonova</i> (vardas, pavardė, parašas) |

19 pav. Darbe naudojamo gama spektrometro patikros liudijimo pavyzdys.

EMCAPLUS (Silena International S.p.A) programinės įrangos aplinkoje kompiuteryje automatiškai atliekama smailių paieška energetiniame spektre gama kvantų energijų intervale nuo 50 keV iki 2700 keV. Analizuojant energetinius gama spektrus, taikomas Gauso statistinės atrankos kriterijus simetrinės formos smailėms su šiomis prielaidomis: 1) gama kvantų sugerties smailės pagrindas lygus keturiskart smailės puspločiui, 2) impulsai smailėje pasiskirstę normaliai, 3) foninių impulsų

skaičius atvirkščiai proporcingas gama kvanto energijai. Identifikuojamos tik tos smailės, kai impulsų skaičius pasirinktoje smailėje tris kartus viršija impulsų skaičiaus standartinį nuokrypį σ .

$$\sigma = \sqrt{N_{net} + N_b \left(1 + \frac{n_i}{n_e}\right)}, \quad (2)$$

čia N_{net} – impulsų skaičius smailėje išskaičiavus foninius impulsus, N_b – foninių impulsų skaičius, n_i – daugiakanalio analizatoriaus kanalų skaičius smailėje, n_e – daugiakanalio analizatoriaus kanalų skaičius foniniams impulsams nustatyti (paprastai 5 kanalai iš smailės kairės ir dešinės pusės).

Smailės registravimo riba L_d – tai smailės identifikavimo kokybinis kriterijus, leidžiantis dar neatlikus realaus matavimo prognozuoti mažiausią impulsų skaičių smailėje, kad ją būtų galima identifikuoti kaip statistiškai patikimą smailę:

$$L_d = 2,71 + 4,65\sigma_b, \quad (3)$$

čia L_d – smailės registravimo riba, esant 5 % tikimybei, kad smailė nebus identifikuota, σ_b – foninių impulsų smailėje standartinis nuokrypis.

Smailės kritinis lygis L_c – tai smailės identifikavimo kokybinis rodiklis, leidžiantis po matavimo atlikimo identifikuoti statistiškai patikimą smailę:

$$L_c = 2,33\sigma_b, \quad (4)$$

čia L_c – smailės kritinis lygis, esant 5 % tikimybei, kad smailė bus klaidingai identifikuota.

Tuo atveju, kai impulsų skaičius smailėje (išskaičiavus foninius impulsus) $N > L_c$, smailė identifikuojama kaip statistiškai patikima:

$$\bar{N} = N \pm k\sigma_{net}, \quad (5)$$

čia \bar{N} – vidutinis impulsų, normaliai pasiskirsčiusių smailėje, skaičius, N – impulsų skaičius smailėje (išskaičiavus foninius impulsus), k – pasikliautinis lygmuo, σ_{net} – impulsų skaičiaus smailėje standartinis nuokrypis ($\sigma_{net} = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_b^2}$, σ – visų impulsų skaičiaus smailėje standartinis nuokrypis).

Tuo atveju, kai impulsų skaičius smailėje (išskaičiavus foninius impulsus) $N < L_c$, smailė neidentifikuojama ir apskaičiuojama impulsų skaičiaus \bar{N} viršutinė riba:

$$\bar{N} < N \pm k\sigma_{net}, \quad (6)$$

Automatinės bandinio energetinio gama spektro analizės ataskaitos pavyzdys kartu su radionuklidų identifikavimo rezultatais pateikiamas 11 lentelėje.

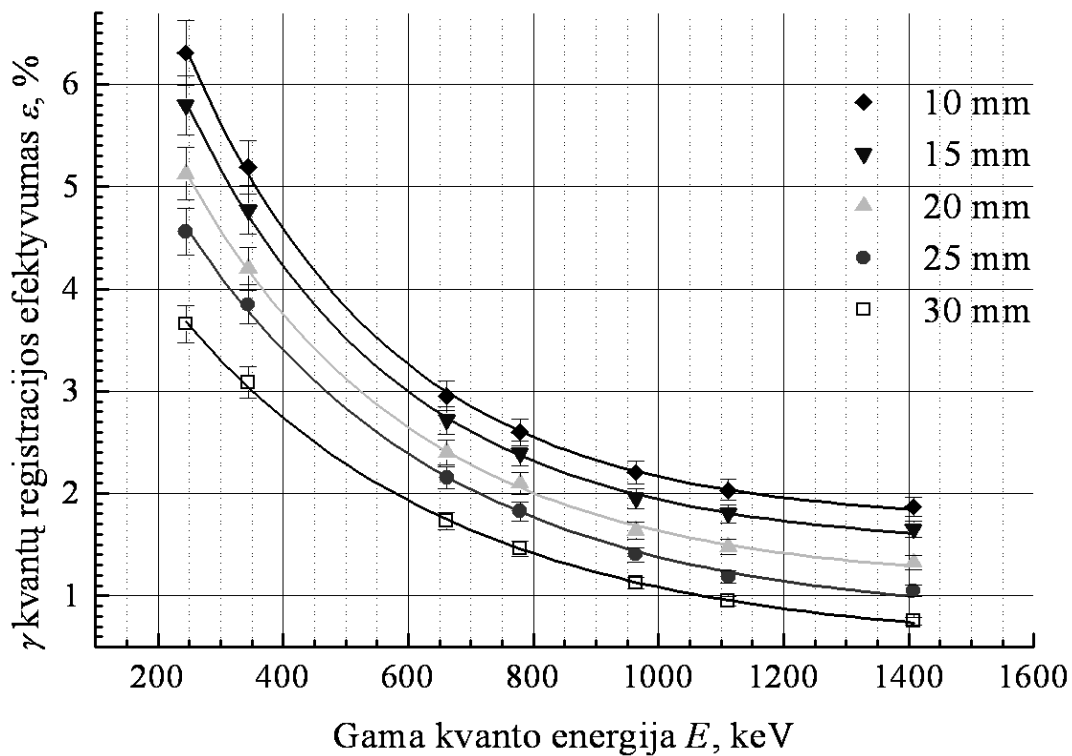
11 lentelė. Pažemio oro aerolio dalelių bandinio energetinio gama spektro analizės ataskaita ir radionuklidų identifikavimo rezultatai. Bandinys paimtas 2006.06.21-07.03 FI stotyje, prasiurbto pro filtrą oro tūris 268 600 m³, bandinio aukštis 22 mm, matavimo laikas 104 000 s.

| | |
|---|---|
| [Silena – EMCAPLUS 1.04.0] Pirm Rugsėjo 25 13:44:47 2006 Bandinio ID.: 3009 Matavimo data: 25/09/06 12:01:43 “Gyvasis” matavimo laikas: 103679.0 s Matavimo laikas: 103730.0 s | Paieškos intervalas: 50 -> 2648 keV Paieškos režimas: visos smailės Statistinis kriterijus: 3.00 FWHM: pagal kalibracinį failą Smailių parametrai: pagal kalibracinį failą Spektro pavadinimas: SP100101.dat |
|---|---|

| Kanalas | Energija, keV | Nuo, keV | Iki, keV | FWHM, keV | Smailės plotas, impulsai | Paklaida, % | Impulsų registravimo sparta, impulsai s ⁻¹ | Radionuklidas |
|---------|---------------|----------|----------|-----------|--------------------------|-------------|---|-------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 344.70 | 238.14 | 234.43 | 241.85 | 1.86 | 1332 | 10.00 | 0.0128 | ²¹² Pb |
| 432.81 | 294.82 | 291.08 | 298.56 | 1.87 | 964.72 | 12.78 | 0.00930 | ²¹⁴ Pb |
| 500.19 | 338.15 | 334.39 | 341.92 | 1.88 | 327.14 | 29.46 | 0.00316 | ²²⁸ Ac |
| 521.03 | 351.56 | 347.79 | 355.33 | 1.88 | 1819.6 | 6.13 | 0.0175 | ²¹⁴ Pb |
| 693.86 | 462.72 | 458.90 | 466.55 | 1.91 | 162.57 | 43.54 | 0.00157 | ²²⁸ Ac |
| 716.59 | 477.34 | 473.51 | 481.17 | 1.92 | 76592 | 0.56 | 0.739 | ⁷ Be |
| 768.45 | 510.70 | 506.85 | 514.54 | 1.92 | 2583.8 | 3.94 | 0.0249 | Anihil. |
| 880.88 | 583.00 | 579.12 | 586.88 | 1.94 | 730.92 | 9.19 | 0.00705 | ²⁰⁸ Tl |
| 921.37 | 609.04 | 605.15 | 612.94 | 1.95 | 1802 | 4.73 | 0.0174 | ²¹⁴ Bi |
| 1002.84 | 661.43 | 657.51 | 665.35 | 1.96 | 484.98 | 12.24 | 0.00468 | ¹³⁷ Cs |
| 1105.04 | 727.16 | 723.21 | 731.11 | 1.98 | 192.92 | 25.60 | 0.00186 | ²¹² Bi |
| 1168.89 | 768.21 | 764.24 | 772.18 | 1.99 | 144.34 | 32.76 | 0.00139 | ²¹⁴ Bi |
| 1210.51 | 794.97 | 790.99 | 798.96 | 1.99 | 183.57 | 25.04 | 0.00177 | ²²⁸ Ac |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---------|---------|---------|---------|------|--------|-------|----------|---|
| 1272.33 | 834.72 | 830.72 | 838.72 | 2.00 | 95.138 | 45.79 | 0.000918 | ⁵⁴ Mn |
| 1312.11 | 860.30 | 856.29 | 864.31 | 2.01 | 121.71 | 35.90 | 0.00117 | ²⁰⁸ Tl |
| 1391.02 | 911.03 | 907.00 | 915.07 | 2.02 | 694.54 | 8.30 | 0.00670 | ²²⁸ Ac |
| 1426.30 | 933.72 | 929.67 | 937.76 | 2.02 | 102.25 | 40.78 | 0.000986 | ²¹⁴ Bi |
| 1474.38 | 964.63 | 960.56 | 968.69 | 2.03 | 164.07 | 25.63 | 0.00158 | ²²⁸ Ac |
| 1480.77 | 968.74 | 964.68 | 972.80 | 2.03 | 398.95 | 12.46 | 0.00385 | ²²⁸ Ac |
| 1716.14 | 1120.05 | 1115.92 | 1124.18 | 2.07 | 565.4 | 9.10 | 0.00545 | ²¹⁴ Bi |
| 1797.69 | 1173.47 | 1168.31 | 1176.62 | 2.08 | 117.37 | 32.31 | 0.00113 | ⁶⁰ Co |
| 1899.48 | 1237.90 | 1233.71 | 1242.08 | 2.09 | 200.23 | 20.84 | 0.00193 | ²¹⁴ Bi |
| 1966.19 | 1280.78 | 1276.58 | 1284.98 | 2.10 | 82.574 | 39.59 | 0.000796 | ²¹⁴ Bi |
| 2046.76 | 1332.56 | 1328.34 | 1336.79 | 2.12 | 80.354 | 38.30 | 0.000775 | ⁶⁰ Co |
| 2116.24 | 1377.22 | 1372.97 | 1381.47 | 2.13 | 150.08 | 20.36 | 0.00145 | ²¹⁴ Bi |
| 2153.04 | 1400.87 | 1396.61 | 1405.12 | 2.13 | 62.667 | 43.18 | 0.000604 | ²¹⁴ Bi, ²²⁸ Ac |
| 2245.83 | 1460.50 | 1456.22 | 1464.79 | 2.14 | 6654.1 | 1.89 | 0.0642 | ⁴⁰ K |
| 2300.47 | 1495.62 | 1491.32 | 1499.92 | 2.15 | 44.951 | 47.65 | 0.000434 | ²²⁸ Ac |
| 2321.43 | 1509.08 | 1504.78 | 1513.39 | 2.15 | 95.028 | 26.45 | 0.000917 | ²¹⁴ Bi |
| 2444.12 | 1587.93 | 1583.59 | 1592.27 | 2.17 | 75.763 | 30.65 | 0.000731 | ²²⁸ Ac |
| 2494.97 | 1620.61 | 1616.25 | 1624.96 | 2.18 | 36.32 | 55.84 | 0.000350 | ²¹² Bi |
| 2510.23 | 1630.41 | 1626.05 | 1634.77 | 2.18 | 50.089 | 40.24 | 0.000483 | ²²⁸ Ac |
| 2664.10 | 1729.28 | 1724.88 | 1733.68 | 2.20 | 119.89 | 19.60 | 0.00116 | ²¹⁴ Bi |
| 2718.25 | 1764.07 | 1759.66 | 1768.49 | 2.21 | 664.68 | 6.48 | 0.00641 | ²¹⁴ Bi |
| 2847.24 | 1846.94 | 1842.49 | 1851.39 | 2.23 | 57.501 | 34.17 | 0.000555 | ²¹⁴ Bi |
| 3269.45 | 2118.17 | 2113.61 | 2122.73 | 2.28 | 67.359 | 27.43 | 0.000650 | ²¹⁴ Bi |
| 3402.55 | 2203.66 | 2199.07 | 2208.26 | 2.30 | 199.55 | 12.99 | 0.00192 | ²¹⁴ Bi |
| 3781.84 | 2447.25 | 2442.55 | 2451.94 | 2.35 | 53.218 | 29.99 | 0.000513 | ²¹⁴ Bi |
| 4041.52 | 2613.99 | 2609.23 | 2618.75 | 2.39 | 1152.3 | 4.55 | 0.0111 | ²⁰⁸ Tl |

Radionuklidų skleidžiamų gama kvantų registracijos efektyvumas tabletės geometrijoje įvertintas formuojant 40 mm diametro skirtingo aukščio tabletes su žinomo aktyvumo OMACH tipo ¹³⁷Cs ir ⁴⁰K druskų milteliais (matricos tankis $\rho \sim 0,9 \text{ g cm}^{-3}$) ir ¹³⁷Cs bei ¹⁵²Eu epoksidinės dervos plokštelėmis (matricos tankis $\rho \sim 1,0 \text{ g cm}^{-3}$). 20 pav. grafiškai pateikiami gama kvantų registravimo efektyvumai tabletės geometrijoje. Gama kvantų registravimo efektyvumo nustatymo santykinė paklaida neviršija 3 % (1 σ pasikliautinis lygmuo).



20 pav. Gama kvantų registravimo efektyvumai, ε , skirtingo aukščio suspausto filtro tabletei.

Radionuklido aktyvumas bandinyje, A (Bq), apskaičiuojamas pagal lygtį [116]:

$$A = \underbrace{\frac{\bar{N}}{t_m \varepsilon \gamma \eta}}_A \cdot \underbrace{\frac{\lambda t_s}{1 - e^{-\lambda t_s}} \cdot e^{-\lambda \Delta t}}_B \cdot \underbrace{\frac{\lambda t_m}{1 - e^{-\lambda t_m}}}_C, \quad (7)$$

čia \bar{N} – impulsų skaičius pasirinktoje gama energetinio spektro smailėje (s^{-1}), ε – gama kvantų registravimo efektyvumas matavimo geometrijoje, γ – gama kvanto išspinduliavimo tikimybė radionuklido skilimo metu, η – aerozolio dalelių sulaikymo ant filtro efektyvumas, λ – radionuklido skilimo konstanta (s^{-1}), t_s , Δt , t_m – bandinio ėmimo laikas, laikotarpis nuo bandinio ėmimo pabaigos iki matavimo pradžios, bandinio matavimo laikas (s), atitinkamai.

(7) lygties nariai A , B , C skirti perskaičiuoti radionuklido aktyvumą bandinio ėmimo momentu, atsižvelgiant į radionuklido skilimą bandinio ėmimo laikotarpiu

(A), laikotarpyje nuo bandinio ėmimo iki matavimo (B) ir bandinio matavimo laikotarpiu (C).

Radionuklidų aktyvumo bandiniuose matavimų rezultatai statistikai apdorojami ORIGIN aplinkoje [117, 118].

Tipinė ^{137}Cs aktyvumo nustatymo pažemio oro aerozolio dalelių bandinyje statistinė matavimo paklaida yra 15-25 %; ^{60}Co ir ^{54}Mn – 25-35 % ir 35-45 %, atitinkamai; ^7Be aktyvumo nustatymo bandinyje statistinė matavimo paklaida yra apie 1 % (1 σ pasikliautinis lygmuo).

Radionuklido aktyvumo koncentracija ore pažemio oro aerozolio dalelių bandinio ėmimo laikotarpiu apskaičiuojama kaip radionuklido aktyvumo bandinyje ir prasiurbto pro filtro oro tūrio santykis. ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{60}Co aktyvumo koncentracijų ore registravimo riba yra $0,1 \mu\text{Bq m}^{-3}$, ^7Be aktyvumo koncentracijų ore registravimo riba yra $10 \mu\text{Bq m}^{-3}$ (20 mm aukščio suspausto filtro bandinys, matavimo laikas 90 000 s, prasiurbto pro filtrą oro tūris $250\,000 \text{ m}^3$).

Radionuklidų aktyvumo koncentracijų ore matavimo metodika įgalina užregistruoti išlekiančių iš Ignalinos AE radionuklidų, kitų dirbtinių, emanacinių ir kosmogeninių radionuklidų aktyvumo koncentracijas pažemio ore.

Pažemio oro aerozolio dalelių bandiniuose, kuriuose buvo išmatuoti AE pagaminti radionuklidai, buvo papildomai tiriamas radionuklidų išplovimas iš aerozolio dalelių bandinių taikant parengtą metodiką.

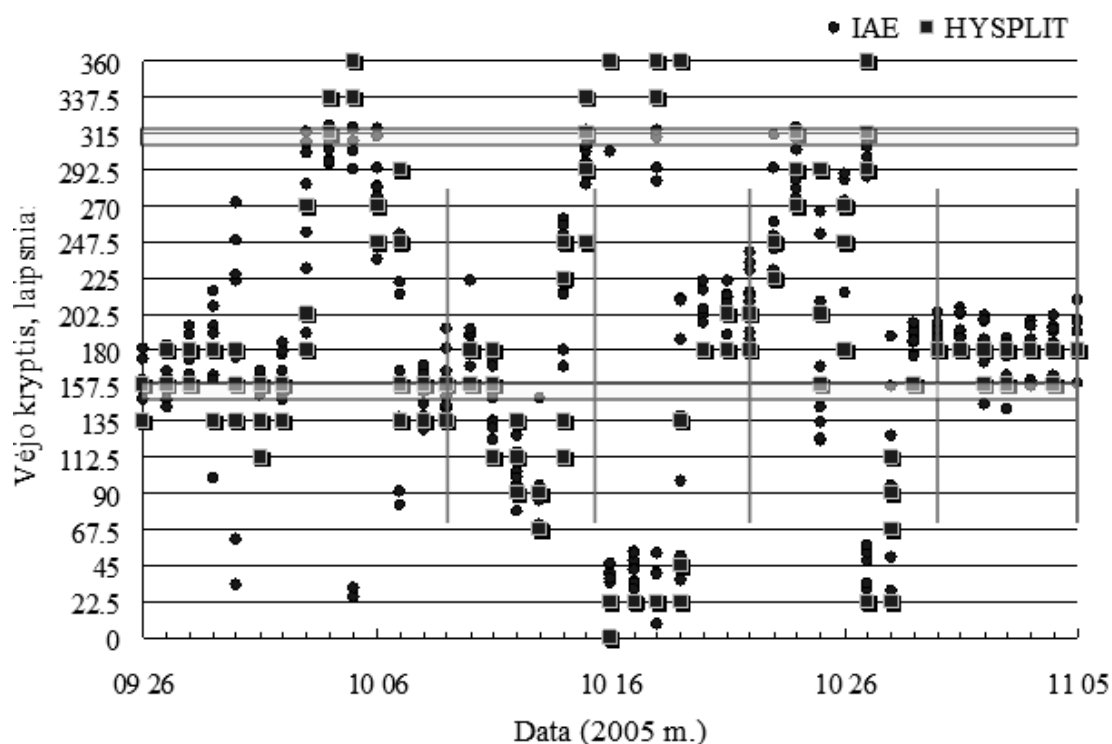
3.2 Radionuklidų aktyvumo koncentracijos ore pasiskirstymo skaičiavimas

Černobylio avarijos pasekmių vertinimo rezultatai parodė operatyvios meteorologinės ir dozimetrinės informacijos trūkumus ir stimuliuo modelavimo sistemų, veikiančių realiu laiku, operatyviai gaunamų meteorologinių duomenų pagrindu, su prognozės elementais, plėtrą. Sukurtos pažangios COSYMA, INTERRAS, RIMPUFF ir kitos kompiuterinės programos, kurių pagalba pagal radionuklidų aktyvumo koncentracijų ore ir iškritose duomenis galima įvertinti radionuklidų jonizuojančiosios spinduliuotės apšvitos dozę. Empirinių turbulentinės difuzijos pažemio ore formulų pagrindu parengti radionuklidų pernašos ribotais atstumais modeliai sėkmingai taikomi radionuklidų aktyvumo koncentracijų ore ir iškritose pasiskirstymo skaičiavimams avarinių situacijų atvejais.

Darbe radionuklido aktyvumo koncentracijų ore pasiskirstymo skaičiavimams lokaliu masteliu buvo naudojamas globalinis oro masių pernašos trajektorijų skaičiavimo ir priemaišų pasiskirstymo ore modelis Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT). Meteorologiniai duomenys neribotai prieinami National Oceanica and Atmospheric Administration Air Resources Laboratory tinklapyje [119].

HYSPLIT modelis yra rekomenduotas Visuotinio branduolinių bandymų nutraukimo sutarties organizacijos (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, CTBTO) ir aprobuotas aerozolio dalelių, radionuklidų nešėjų, pernašos su oro masėmis trajektorijoms skaičiuoti [120-124]. Meteorologiniai parametrai pateikiami 6 val. arba 3 val. intervalais, skirtingais izobariniais lygiais. Parametrų erdvinė skyra yra apie 2,5 °.

HYSPLIT modelio meteorologinio archyvo duomenys (vėjo kryptis, atmosferinių kritulių kiekis) buvo palyginti su Ignalinos AE Aplinkos apsaugos laboratorijos meteorologiniais duomenimis, gautais 2005 metais (21 pav.).



21 pav. Vėjo krypties eiga pagal HYSPLIT modelio meteorologinio archyvo ir Ignalinos AE duomenys iškritų bandinio ėmimo laikotarpiu 2005.09.26-11.05. Vertikaliomis linijomis pažymėti pažemio oro aerozolio dalelių bandinių ėmimo laikotarpiai 2005.09.26-10.09, 10.09-15, 10.15-22, 10.22-30, 10.30-11.05.

HYSPLIT modelio meteorologinių duomenų archyvo vėjo krypties, atmosferinių kritulių laikinė eiga patenkinamai koreliuoja su Ignalinos AE meteorologinių parametrų laikine eiga ($R = 0,7-0,9$, $p < 0,0001$). Tai leidžia naudoti HYSPLIT modelio meteorologinių duomenų archyvą skaičiuojant radionuklido aktyvumo pasiskirstymą ore lokaliniu masteliu.

Skaičiuojant radionuklidų aktyvumo koncentracijų pažemio ore pasiskirstymus vasaros laiku išlėkų efektyvus aukštis nebuvo vertinamas. Žiemą (gruodis-vasaris) efektyvus išlėkų aukštis yra 200 m. Ignalinos AE regione vidutinis metinis vėjo greitis yra apie 3,5 m/s, o maksimalus vėjo greitis (gūšiai) gali siekti 28 m s^{-1} pažemėje.

Modeliavimo rezultatai sulyginami su eksperimentiniais rezultatais. Skirtumai tarp rezultatų iki vienos eilės dydžio laikomi patenkinamais ir paaiškinami neapibrėžtimis, susijusiomis su standartinių vertikalios ir horizontalios nuokrypių σ_y ir σ_z verčių nustatymu, išlėkų fakelo atspindžio nuo žemės paviršiaus matavimo taške koeficiento nustatymu, advekciniu fakelo poslinkiu [125], konvekciniams oro srautams nuo aušintuvo [126].

3.3 Iškritų bandinių rinkimas

Atominių elektrinių poveikio zonoje paimtuose iškritų bandiniuose yra svarbu registruoti globalios kilmės ir elektrinėje pagamintus radionuklidus. Atominėse elektrinėse pagamintų radionuklidų aktyvumai iškritose yra maži ir tam, kad iškritų bandinyje būtų galima patikimai užregistruoti atominėje elektrinėje pagamintų radionuklidų gama spinduliavimą, didinamas iškritų bandinio paėmimo plotas, tūris ir trukmė.

Ignalinos AE poveikio zonoje, FI stotyje nuo nuolaidaus 10 m^2 paviršiaus kas 1-2 mėnesius renkami lietaus vandens bandiniai. 22 pav. pavaizduota lietaus bandinių ėmimo sistema FI stotyje.



22 pav. Iškritų ėmimo sistema FI stotyje.

Lietaus vanduo nuo nuolaidaus 10 m² paviršiaus per drenažo vamzdį surenkamas 1 vonioje. Bandinys filtruojamas per 0,1 mm porų filtrą, kad atskirti iškritų bandinyje esančias stambias daleles.

Žiemos sezono metu paimamas 1-2 m² plote susikaupęs sniego (po paskutinio sniego, prieš pirmą lietų) bandinys. Sniego bandinys tirpinamas, nufiltruojamas ir gaunamas analogiškas bandinys, kaip ir vasarą.

Metalų hidroksidai plačiai naudojami radionuklidų koncentravimui aplinkos bandiniuose [127-131]. Ši metodika naudojama nuo pat FI stoties įkūrimo pradžios, daug kartų tikrinta įnešant stabilius nešėjus ir leidžia kritulių vandenyje koncentruoti radionuklidus, buvusius kaip joninėje būsenoje, taip ir aerozolio dalelių sudėtyje [132, 133].

Alikvotinėje 80 l bandinio dalyje, paimtoje iš 2 vonios arba ištirpinto sniego, sąsėdos su Fe³⁺, Mn²⁺ ir Co³⁺ hidroksidais metodu nusodinamos lietaus vandens priemaišos.

Lietaus arba ištirpinto sniego bandinys parūgštinamas 1 mol l⁻¹ druskos rūgšties tirpalu iki pH (pH ≈ 3) ir filtratą pridedama koncentruotų Fe³⁺, Mn²⁺ ir Co³⁺ druskų tirpalų: 15 ml 1,4 mol l⁻¹ FeCl₃, 5 ml 0,8 mol l⁻¹ MnCl₂ ir 5 ml 0,8 mol l⁻¹ CoCl₂. pH vertė tikrinama „Phenanon“ universalios indikatoriaus juostelėmis (Macherey Nagel GmbH & Co. KG). Bandinys kruopščiai išmaišomas. Maišant

filtratą po truputį įlašinama koncentruoto NH_4OH amoniako tirpalo iki $\text{pH} \approx 9$. Bandinyje prasideda Fe^{3+} , Mn^{2+} ir Co^{3+} , taip pat atominės elektrinės kilmės $^{54}\text{Mn}^{2+}$ ir $^{60}\text{Co}^{3+}$ hidroksidų susidarymas ir koaguliacija. Bandinyje esantys Mn^{2+} ir Co^{3+} jonai ir aerolio dalelės, taip pat ^{137}Cs junginiai pagaunamos metalų hidroksidų dalelėmis ir kartu su jomis nusėda. Tirpalas paliekamas nusistovėti parai, po to tirpalas nudekantuojamas. Iš likusių 10 l tirpalo su metalų hidroksidų nuosėdomis su priemaišiniaisiais elementais formuojamas *1 bandinys*. Kaip *2 bandinys* paimama alikvotinė 10 l nudekantuoto tirpalo dalis. Laboratorijoje *1 bandinys* papildomai nudekantuojamas, ir 9 l tirpalo prijungiama prie *2 bandinio*. Į bandinius pridedama 8 mol l^{-1} koncentruotos azoto rūgšties HNO_3 , kol nuosėdos visiškai ištirpsta. Abudu bandiniai lėtai išgarinami. Garinimo likučiai išdėstomi ant Petrianovo filtrų ir spaudžiamos standartinės geometrijos tabletės. Radionuklidų aktyvumai bandinyje išmatuojami gama spektrometriniu metodu.

^{60}Co ir ^{54}Mn koncentravimo sąsėdos su metalų hidroksidais metodu išieiga buvo nustatyta 2005 metais Vilniaus Universiteto Chemijos fakulteto Bendrosios ir Neorganinės chemijos katedroje (dr. doc. L. Salickaitė Bunikienė) [134]. Periodinės lentelės pereinamųjų metalų ^{60}Co , ^{54}Mn išieigos buvo prilyginamos pagrindinio reagento geležies jonų Fe^{3+} išieigai bandinyje. Fe^{3+} išieiga, W , buvo nustatoma kaip santykis tarp Fe^{3+} kiekio *1 bandinyje* (C'_{Fe}) ir įpildo į kritulių bandinį pradžioje Fe^{3+} kiekio (C_{Fe}):

$$W = C'_{\text{Fe}} / C_{\text{Fe}}, \quad (8)$$

^7Be ir ^{137}Cs aktyvumai 80 l bandiniuose, A_{80} (Bq), buvo įvertinti pagal radionuklidų aktyvumus *1 bandinyje* ir *2 bandinyje*.

$$A_{80} = A_1 + 4,1 A_2, \quad (9)$$

čia A_1 – radionuklido aktyvumas *1 bandinyje* (Bq), A_2 – radionuklido aktyvumas *2 bandinyje* (Bq). Daugiklis 4,1 naudojamas perskaičiuoti radionuklido aktyvumą alikvotinėje 19 l tirpalo dalyje (*2 bandinys*) visam lietaus bandinio tūriui 80 l ir laikoma, kad išmatuoti ^7Be ir ^{137}Cs aktyvumai *1 ir 2 bandiniuose* 100 % atspindi radionuklidų kiekius 80 l alikvotinėje iškritų bandinio dalyje.

^{60}Co ir ^{54}Mn koncentravimo sąsėdos su metalų hidroksidais metodu išeiga buvo apie 75%, ^{137}Cs – apie 20%. Radionuklidų koncentravimo sąsėdos su metalų hidroksidais metodu išeigos artimos išeigomis, nustatytomis prieš 10 metų [135].

Lietaus arba ištirpinto sniego bandinio pradiniam apdorojimo etape atskirtos ant filtro stambios dalelės sudaro stambiadiispersinę iškritų bandinio frakciją. Dalelės filtrate sudaro smulkiadiispersinę iškritų bandinio frakciją. Radionuklidų aktyvumo iškritų bandiniuose matavimo rezultatai leidžia apskaičiuoti radionuklidų srautus iš oro į dirvožemio paviršių ir iškritų dirvožemio paviršiuje tankį atskirai stambiadiispersinei ir smulkiadiispersinei iškritų bandinio frakcijoms.

Radionuklidų iškritų dirvožemio paviršiuje tankis, D_s (Bq m^{-2}), kai buvo renkami bandiniai nuo 10 m^2 nuolaidaus paviršiaus, apskaičiuojamas, remiantis tikslesniais kritulių kiekiu I (mm) per bandinio rinkimo laikotarpį meteorologinių stočių duomenimis:

$$D_s = A_s \times (I / V_s), \quad (10)$$

čia D_s – radionuklido iškritų (smulkiadiispersinė frakcija) tankis (Bq m^{-2}), A_s – radionuklido aktyvumas nufiltruotame kritulių bandinyje (Bq), I – kritulių kiekis bandinio ėmimo laikotarpiu (mm), kas atitinka kritulių tūrį į ploto vienetą (l m^{-2}), V_s – lietaus arba sniego vandens tūris (l).

Radionuklido iškritų (stambiadiispersinės frakcijos) tankis, D_p (Bq m^{-2}), įvertinamas aktyvumo ir bandinio surinkimo ploto santykiu:

$$D_p = A_p / S, \quad (11)$$

čia D_p – stambiadiispersinės iškritų bandinio frakcijos radionuklidų iškritų dirvožemio paviršiuje tankis (Bq m^{-2}), A_p – radionuklido aktyvumas filtre (Bq), S – nuolaidaus paviršiaus arba sniego bandinio ėmimo plotas (m^2).

Radionuklido srautas iš oro į dirvožemio paviršių, F ($\text{Bq m}^{-2} \text{ mėnuo}^{-1}$), apskaičiuojamas:

$$F = D / t, \quad (12)$$

čia D – smulkiadispersinės (D_S) arba stambiadispersinės (D_P) iškritų bandinio frakcijos radionuklidų iškritų dirvožemio paviršiuje tankis (Bq m^{-2}), t – kritulių bandinio ėmimo laikotarpis, gautas normalizuojant iškritų bandinio ėmimo laikotarpį į vieną mėnesį.

Remiantis radionuklidų aktyvumo koncentracijų ore matavimo rezultatais ir išmatuotais radionuklidų (stambiadispersinė iškritų bandinio frakcija) iškritų srautais iš oro į dirvožemio paviršių, F_p ($\text{Bq m}^{-2} \text{ mėnuo}^{-1}$), galima apskaičiuoti radionuklidų sauso iškritimo greitį, v_g (m s^{-1}):

$$v_g = \frac{F_p}{\bar{A}_V}, \quad (13)$$

čia \bar{A}_V – radionuklido aktyvumo koncentracijos ore vidutinė vertė kritulių bandinio ėmimo laikotarpiu (Bq m^{-3}). Radionuklidų sauso iškritimo greičio vertės buvo naudojamos skaičiuojant radionuklidų aktyvumo koncentracijų ore pasiskirstymus Ignalinos AE regione.

Kaip parodyta aukščiau, darbe naudotos radionuklidų aktyvumo koncentracijų iškritose matavimų metodikos įgalina įvertinti radionuklidų srautą į žemės paviršių.

3.4 Aerozolio dalelių, radionuklidų nešėjų, išplovimo vandeniū metodika

Išplovimas yra neorganinių ir organinių teršalų bei radionuklidų atpalaidavimas iš kietos į vandens fazę, kurio metu vyksta tirpinimo, desorbcijos ir kompleksų susidarymo procesai, veikiant bandinius skirtingo pH ir cheminės sudėties tirpalais [136]. Vienas populiariausių tirpiklių, naudojamų radionuklidų nešėjų išplovimo eksperimentuose, yra distiliuotas vanduo [137, 138].

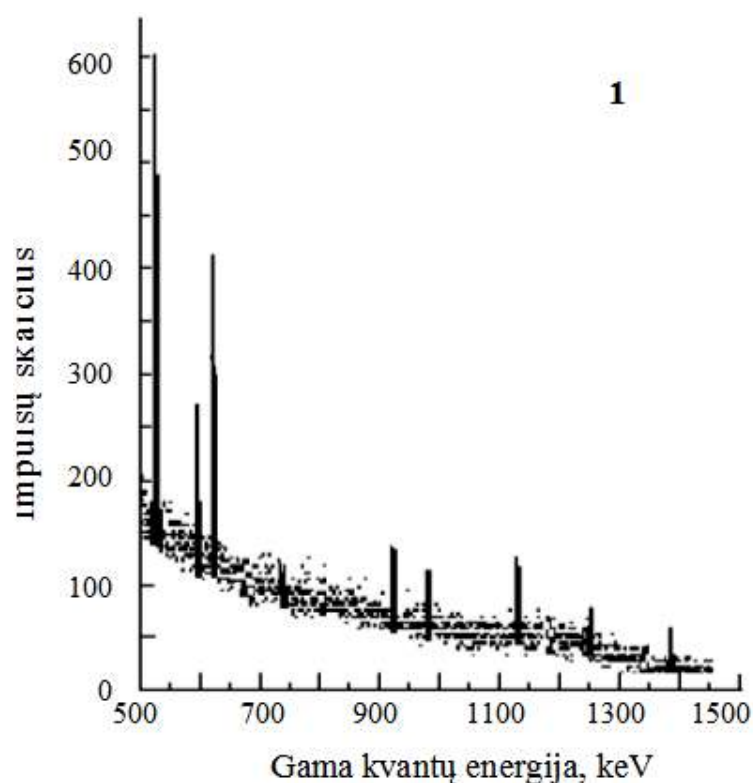
Darbe pasirinkome surinktų smulkiapluoštiniais filtrais aerozolio dalelių išplovimą distiliuotu vandeniū. Eksperimento metu buvo išmatuojami radionuklidų aktyvumai šiose bandinio frakcijose: pradiniam *bandinyje*, bandinyje po eksperimento (*likutyje*) ir gautame *tirpale*.

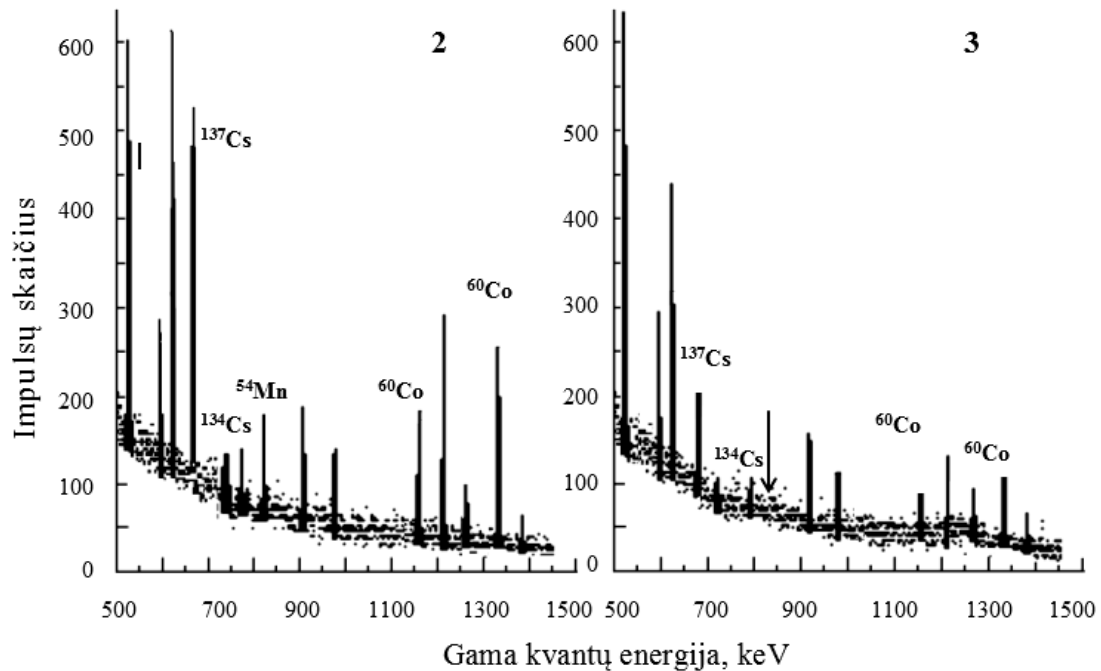
Pažemio oro aerozolio dalelių bandinys (*bandinys*) mechaniškai suardomas ir užpilamas 500 ml distiliuoto vandens. Po 8 val. ekstrakcijos (darbo dienos trukmė) aerozolio dalelių bandinio liekanos su filtro medžiaga presuojamos į tabletę ir

nustatomi radionuklidų aktyvumai bandinyje. Radionuklidų aktyvumai tirpale buvo išmatuojami, garinant parūgštintą tirpalą, pagamintuose standartinės geometrijos bandiniuose. Radionuklidų aktyvumai aerosolio dalelių bandinyje po eksperimento (*likutis*) nustatomi gama spektrometriniu metodu tiksliai atkartojamomis bandinio ir detektoriaus išsidėstymo sąlygomis, kas leidžia tiksliau lyginti radionuklidų aktyvumus bandinyje iki eksperimento ir po eksperimento.

Ignalinos AE ventiliaciniame ore surinktų ant filtrų aerosolio dalelių bandinys (*bandinys*) užpilamas 500 ml distiliuoto vandens. Po 8 val. ekstrakcijos bandinys išdžiovinamas kambario temperatūroje.

Gama spektrometriniu metodu išmatuojamas aerosolio dalelių bandinio energetinis gama spektras. 23 pav. parodyti energetinių gama spektrų pavyzdžiai.

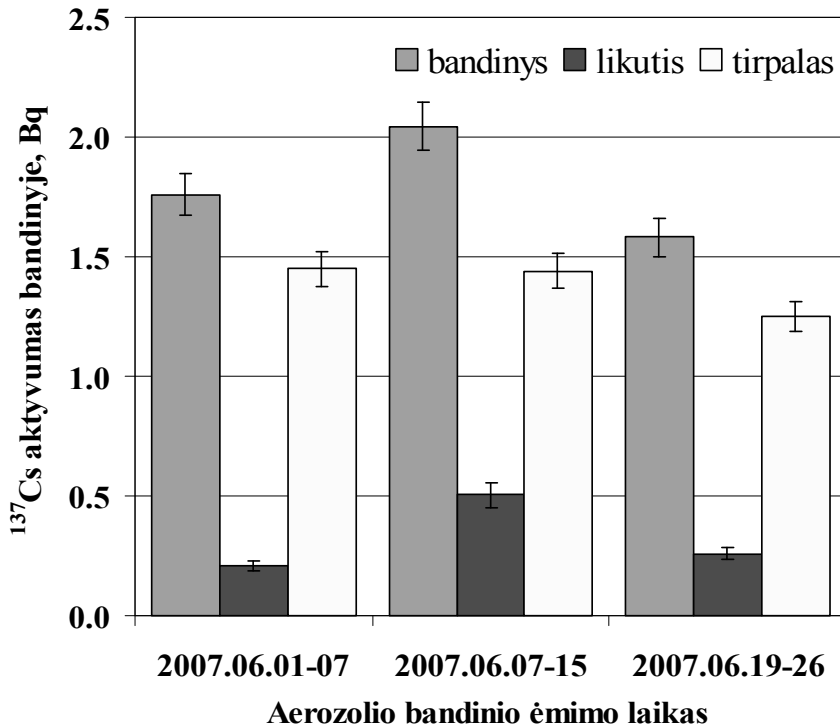




23 pav. Foninis energetinis gama spektras (1), *bandinio* energetinis gama spektras (2) ir *likučio* po radionuklidų išplovimo iš aerozolio dalelių bandinio eksperimento energetinis gama spektras (3). Bandinys paimtas Ignalinos AE 2 bloko ventiliacinio kamino ore 2007.06.19-26 d. Spektrų rinkimo laikas 90 000 s.

Kaip matyti iš 23 pav., bandinio energetiniame gama spektre po aerozolio dalelių išplovimo iš aerozolio dalelių bandinio eksperimento (3) registruojama mažiau radionuklidų skleidžiamų gama kvantų nei iki eksperimento (2).

Aerozolio dalelių, radionuklidų nešėjų, išplovimo metodikos parengimo metu atskirose aerozolio bandinio frakcijose buvo matuojami radionuklidų aktyvumai, kad nustatyti metodinius nuostolius ir įvertinti radionuklidų aktyvumo balansą. 24 pav. pateikiami ^{137}Cs aktyvumai trijų Ignalinos AE ventiliacinio oro aerozolio dalelių bandinių frakcijose.



24 pav. ^{137}Cs aktyvumai eksponuotuose filtruose (Bq) (*bandinys*) iki eksperimento, filtruose po eksperimento (*likutis*) ir gautuose tirpaluose (*tirpalas*). Filtrai eksponuoti Ignalinos AE 2 bloko kamino ventiliaciniame ore 2007.06.01-07, 2007.06.07-15, 2007.06.19-26 d. Spektrų rinkimo laikas 80 000 -100 000 s.

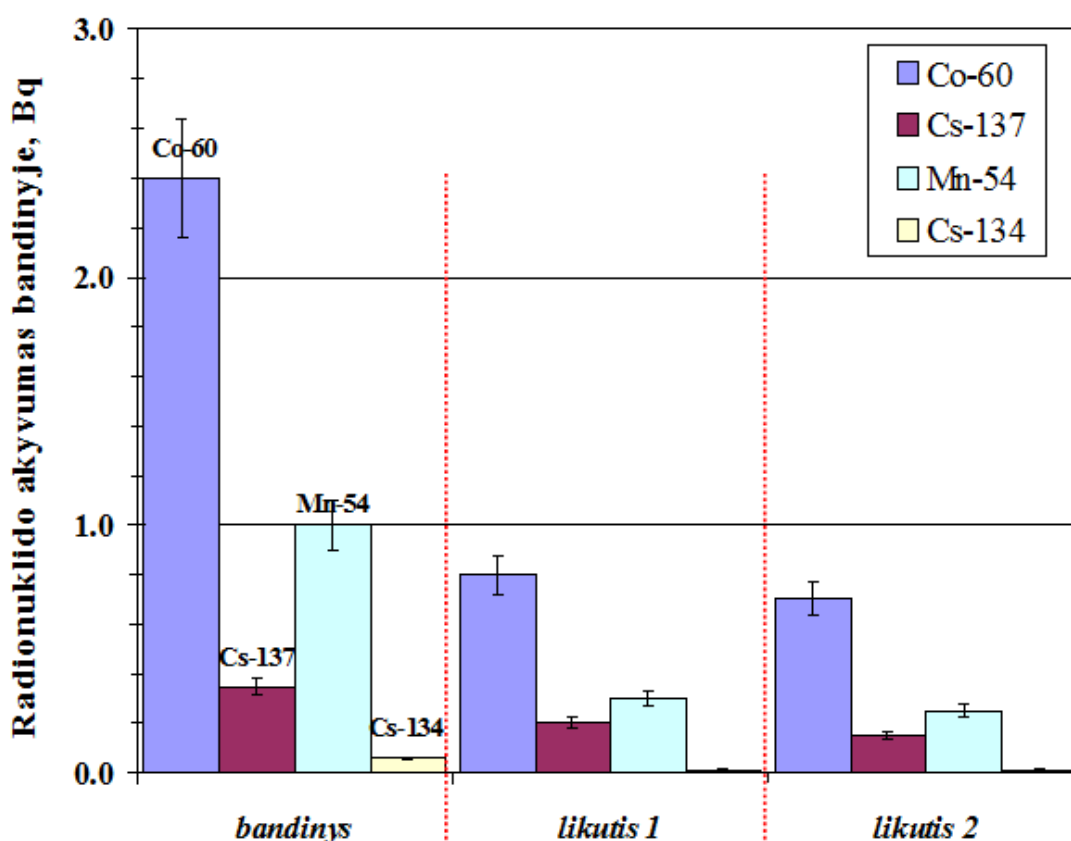
Rezultatai parodo, kad radionuklido aktyvumų filtre ir tirpale po eksperimento suma paklaidų ribose sutampa su radionuklido aktyvumu pradiniam bandinyje. Matuojant radionuklidų aktyvumą pradiniam bandinyje ir likutyje po eksperimento išlaikoma ta pati matavimo geometrija. Matuojant radionuklidų aktyvumą tirpale, buvo naudojamas skirtingos geometrijos bandinys. Radionuklido aktyvumo filtre po eksperimento ir radionuklido aktyvumo filtre iki eksperimento santykis nustatomas tiksliau, tačiau atspindi išplautoje aerolio dalelių frakcijoje radionuklidų aktyvumo santykį su radionuklido aktyvumu pradiniam bandinyje.

Išplautoje aerolio dalelių bandinio frakcijoje radionuklido aktyvumo santykis su radionuklido aktyvumu pradiniam bandinyje nustatomas:

$$W = \frac{A_t}{A} = \frac{A - A_{nt}}{A} = 1 - \frac{A_{nt}}{A}, \quad (14)$$

čia A – radionuklidų aktyvumas filtre (Bq), A_t – radionuklidų aktyvumas tirpale (Bq), A_{nt} – radionuklidų aktyvumas filtre po eksperimento (Bq), W – išplautoje aerosolio dalelių bandinio frakcijoje radionuklido aktyvumo santykis su radionuklido aktyvumu pradiname bandinyje.

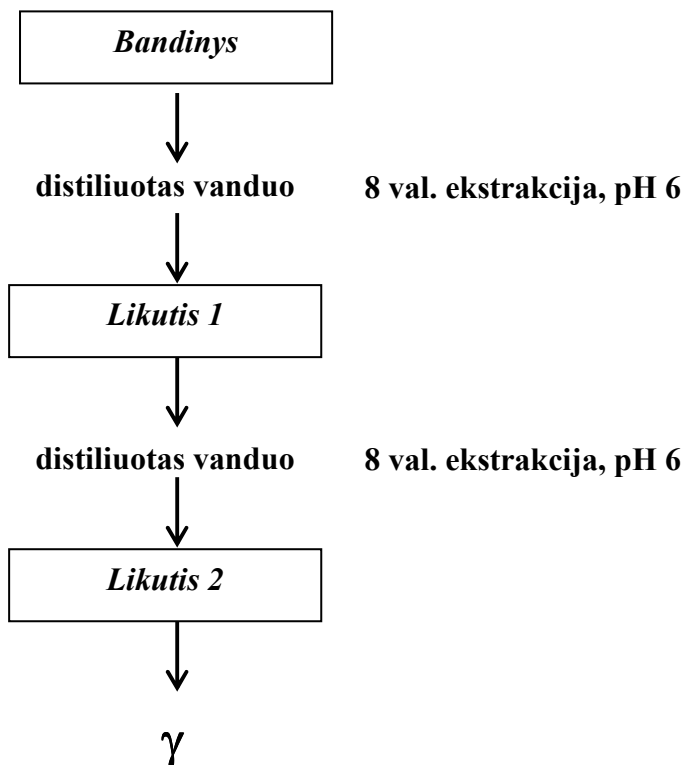
Radionuklido aktyvumų A ir Ant absoliučios paklaidos δA ir δAnt lygios radionuklido aktyvumo matavimo statistinėms paklaidoms. Santykinė paklaida, $\delta W/W$, įvertinta kaip radionuklido aktyvumo bandinyje iki eksperimento, $\delta A/A$, ir radionuklido aktyvumo bandinyje po eksperimento, $\delta Ant/Ant$, santykinų paklaidų suma. Surinktų aerosoliniais filtrais aerosolio dalelių, radionuklidų nešėjų, išplovimo vandeniu procedūra buvo kartojama dar kartą tam, kad būtų įsitikinta, ar tikrai po eksperimento į vandenį patenka visi radionuklidai, kurie galėjo išsiplauti kartu su aerosolio dalelėmis. 25 pav. pateikiami nuosekliai pakartotų aerosolio dalelių bandinių išplovimo eksperimentų rezultatai.



25 pav. ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{54}Mn ir ^{134}Cs aktyvumai bandinyje (Bq) iki surinktų filtrais aerosolio dalelių bandinių (*bandinys*) išplovimo eksperimento, po eksperimento (*likutis 1*) ir pakartotinio eksperimento (*likutis 2*). Bandinys paimtas Ignalinos AE 2 bloko kamino ventiliaciniame ore 2007.06.26-07.03. Spektro rinkimo laikas 95000 s.

Nuosekliai pakartotų aerosolio dalelių bandinių išplovimo eksperimentų rezultatai dar kartą parodo, kad radionuklidų aktyvumai filtre po eksperimento ir po pakartotinio eksperimento sutampa paklaidų ribose.

Atsižvelgiant į aukščiau išdėstytą, siūloma aerosolio dalelių bandinių išplovimo vandeniu nustatymo schema (26 pav.):

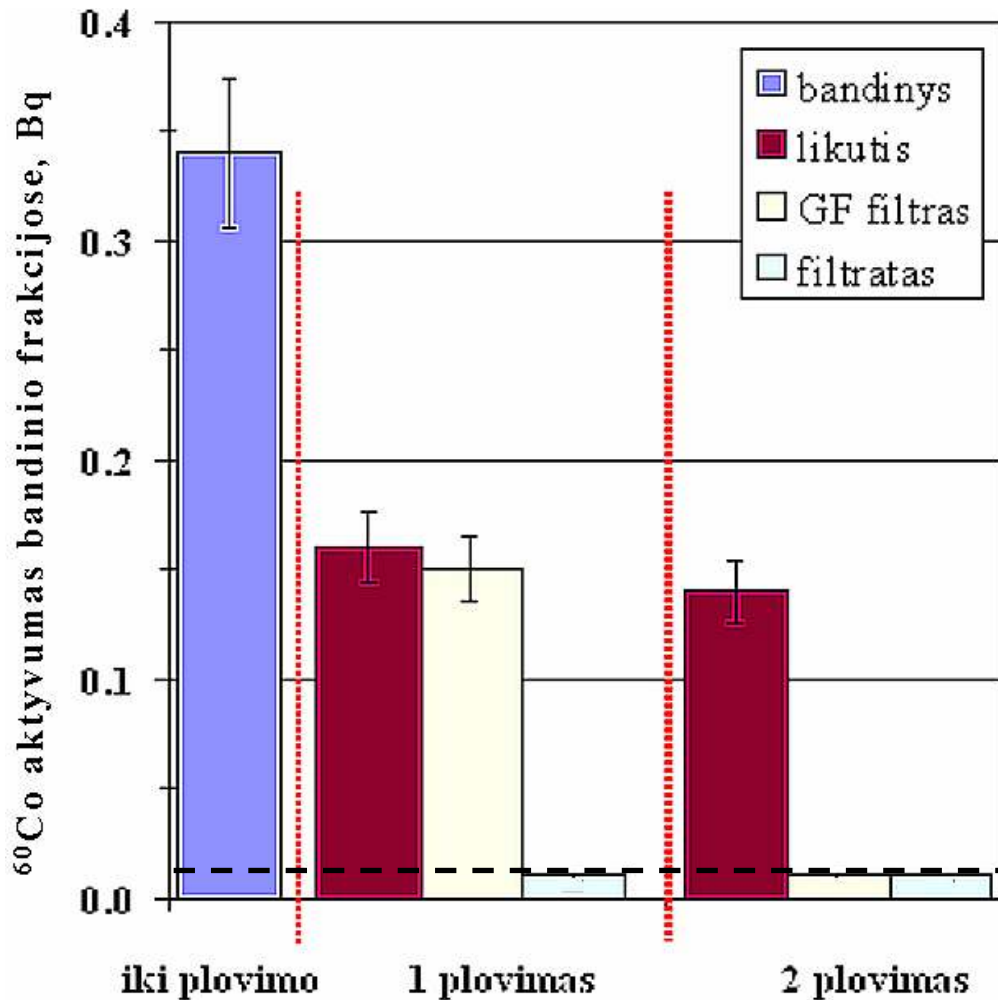


26 pav. Surinktų filtrais aerosolio dalelių, radionuklidų nešėjų, bandinių išplovimo vandeniu nustatymo schema. „Bandinys“ – filtrais surinktų aerosolio dalelių, radionuklidų nešėjų, bandinys. „Likutis 1“ ir „Likutis 2“ – filtras po pirmo ir pakartotinio eksperimentų. „ γ “ – radionuklidų aktyvumai bandinyje išmatuojami gama spektrometriniu metodu.

Aerosolio dalelių išplovimo metodikos parengimo metu papildomai buvo ištirti tirpalai, gauti atlikus išplovimo eksperimentus. Tirpalas nufiltruojamas per membraniinį stiklo pluošto filtrą. Tirpale esančios, didesnės nei 0,45 μm aerosolio dalelės buvo atskiriamos nufiltruojant tirpalą pro stiklo pluošto *GF filtrą* (porų dydis 0,45 μm , Whatman Glass Fiber). *Filtratas* buvo parūgštinamas 8 mol l^{-1} azoto rūgšties tirpalu, išgarinamas iki 50 ml ir supilamas į Petri lėkštelę. Radionuklidų

aktyvumai *bandinyje*, *likutyje*, *GF filtru* ir *filtrate* buvo išmatuojami gama spektrometriniu metodu.

27 pav. grafiškai pateikiami radionuklidų aktyvumai atskirose aerozolio dalelių, surinktų filtrais, bandinio frakcijose.



27 pav. ^{60}Co aktyvumai bandinyje (Bq) iki išplovimo eksperimento (*bandinys*), po eksperimento (*1 plovimas*) ir po pakartotinio eksperimento (*2 plovimas*). Bandinys paimtas Ignalinos AE 2 bloko ventiliacinėje sistemoje 2008.04.23. Pro filtrą prasiurbto ventiliacinio oro tūris $0,4 \text{ m}^3$. Spektro rinkimo laikas 90 000 s. Punktyrine linija pavaizduota radionuklido aktyvumo bandinyje registravimo riba.

Atlikus aerozolio dalelių *bandinio* išplovimo eksperimentą, dalis aerozolio dalelių, radionuklidų nešėjų, lieka ant filtro, kita dalis pereina į tirpalą ir beveik visiškai atskiriama ant membraninio filtro. Radionuklidų aktyvumai *filtrate* buvo žemiau radionuklidų aktyvumo registravimo ribos (10 mBq). Radionuklido aktyvumo išplautame filtre (*likutis*) ir membraniniame filtre (*GF filtras*) suma paklaidų ribose sutampa su radionuklido aktyvumu pradiname bandinyje.

Kaip matyti iš 27 pav., išplautoje aerozolio dalelių bandinio frakcijoje radionuklido aktyvumas lygus radionuklidų aktyvumui aerozolio dalelėse, surinktose ant membraninio filtro, ir išplautoje aerozolio dalelių bandinio frakcijoje radionuklido aktyvumo santykis su radionuklido aktyvumu pradiname bandinyje (14) nesikeičia.

Atlikus pakartotinį aerozolio dalelių bandinio (*likučio*) išplovimo eksperimentą, radionuklido aktyvumas *likutyje* beveik nesikeičia ir sutampa su radionuklido aktyvumu *likutyje* po pirmo išplovimo. Po pakartotinio aerozolio dalelių bandinio (*likučio*) išplovimo eksperimento radionuklidų aktyvumai *filtrate* buvo žemiau jų registravimo ribos.

Rezultatai dar kartą patvirtina, kad radionuklido aktyvumų skirtingose aerozolio bandinio frakcijose suma paklaidų ribose sutampa su radionuklido aktyvumu pradiname bandinyje ir atlikus pakartotinį išplovimo eksperimentą radionuklido aktyvumas nesikeičia paklaidų ribose bei sutampa su radionuklido aktyvumu membraniniame filtre, per kurį buvo nufiltruotas tirpalas.

2009 metais atliktas darbe naudojamos aerozolio dalelių bandinių išplovimo vandeniu metodikos rezultatų palyginimas su Tessier pakopinės ekstrakcijos metodika [139] gaunamais rezultatais.

Pakopinės ekstrakcijos metodika, analogiška aprašytai darbe [102], panaudota aerozolio dalelių surinktų ant filtrų Ignalinos AE ventiliaciniame kamine tyrimui. Lygiagrečiai analogiškų bandinių tyrimui naudota mūsų aerozolio dalelių bandinių išplovimo vandeniu metodika. Pirmame pakopinės ekstrakcijos metodikos etape ekstrahentu naudojamas distiliuotas vanduo. Šis etapas analogiškas darbe naudojamai aerozolio dalelių bandinių išplovimo vandeniu metodikai. Rezultatai rodo, kad aerozolio dalelių bandinių išplovimo vandeniu rezultatai, taikant darbe pasiūlytą metodiką ir Tessier pakopinės ekstrakcijos metodikos pirmą etapą, sutampa paklaidų ribose (12 lentelė).

12 lentelė. Radionuklidų aktyvumai Ignalinos AE ventiliacinio oro aerozolio dalelių bandiniuose iki aerozolio dalelių bandinių išplovimo vandeniu eksperimentų ir atskirose bandinio frakcijose po eksperimentų bei 1) radionuklidų aktyvumų santykis membraniniame filtre ir pradiniame bandinyje, W_1 , %, ir 2) radionuklidų aktyvumų santykis likutyje ir pradiniame bandinyje, W_2 , %. a) Tessier pakopinės ekstrakcijos metodikos pirmas etapas, b) darbe naudojama aerozolio dalelių bandinių išplovimo vandeniu metodika.

| Nr | Aerozolio bandinio ėmimo laikotarpis | ^{137}Cs | | | | ^{60}Co | | | | | |
|---|--------------------------------------|-------------------|----------|-------------|-------------|------------------|----------|-------------|-------------|-----------|-------------|
| | | Aktyvumas, mBq | | | | Aktyvumas, mBq | | | | | |
| | | A | A_{nt} | $A_{memb.}$ | $A_{tirp.}$ | A | A_{nt} | $A_{memb.}$ | $A_{tirp.}$ | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| a) Tessier pakopinės ekstrakcijos metodika | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | W_1 , % | | | | W_1 , % | |
| 1 | 2007.07. 3-5 | 220 | 160 | 50 | – | 27±5 | 180 | 140 | 30 | – | 22±5 |
| 2 | 2007.07. 6-10 | 190 | 140 | 50 | – | 26±5 | 130 | 100 | 30 | – | 23±5 |
| b) Darbe pasiūlyta aerozolio dalelių bandinių išplovimo vandeniu metodika | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | W_2 , % | | | | W_2 , % | |
| 1 | 2007.07. 27-08.31 | 170 | 130 | | | 24±5 | 130 | 100 | | | 23±5 |
| 2 | 2007.07. 25-31 | 120 | 80 | | | 31±6 | 160 | 130 | | | 19±4 |

„–“ – radionuklido aktyvumas bandinyje žemiau registravimo ribos

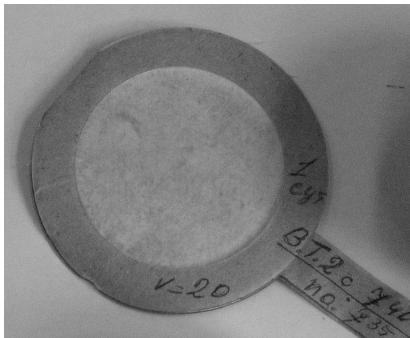
Po pakopinės ekstrakcijos metodikos pirmo etapo likusiuose aerozoliniuose filtruose papildomai buvo atliktas aerozolio dalelių bandinių išplovimo vandeniu nustatymas pagal pakopinės ekstrakcijos metodikos antrą (ekstrahentas 1 M MgCl_2 tirpalas) ir trečią etapą (ekstrahentas 1 M NH_4Cl tirpalas). Rezultatai verti dėmesio, tačiau bandinių surinktų AE ventiliacinėje sistemoje, kur, kaip medžiaga aerozolių gamybai, dominuoja persotinti vandens garai, tyrimo duomenų interpretacijai mažai informatyvūs.

3.4.1 Aerozolio dalelių, radionuklidų nešėjų, bandinių išplovimo vandeniu eksperimentams atlikti paėmimas

Aerozolio dalelių, radionuklidų nešėjų, bandinių išplovimo vandeniu eksperimentams buvo paimti aerozolio dalelių bandiniai sistemos „Ignalinos AE – aplinka“ vietose, kur aerozolio dalelių, radionuklidų nešėjų, savybės, kaip seka iš literatūros apžvalgos, buvo skirtingos.

Darbe atlikti aerozolio dalelių bandinių, surinktų pažemio ore FI stotyje Ignalinos AE regione 2004-2005 metais, Ignalinos AE reaktorių ventiliacinių kaminų ore 2006-2007 metais ir papildomai IAE ventiliacinių sistemų ore 2008 metais, išplovimo vandeniui eksperimentai.

Pažemio oro aerozolio dalelių bandinių paėmimas aprašytas aukščiau metodikos skyriuje (žr. 43 psl.). Ignalinos AE reaktorių ventiliacinių kaminų ore aerozolio dalelių bandiniai paimti ant aerozolinių AFA filtrų (M. ir T. Litvinovai, IAE Radiacinės saugos laboratorija) (28 pav.).

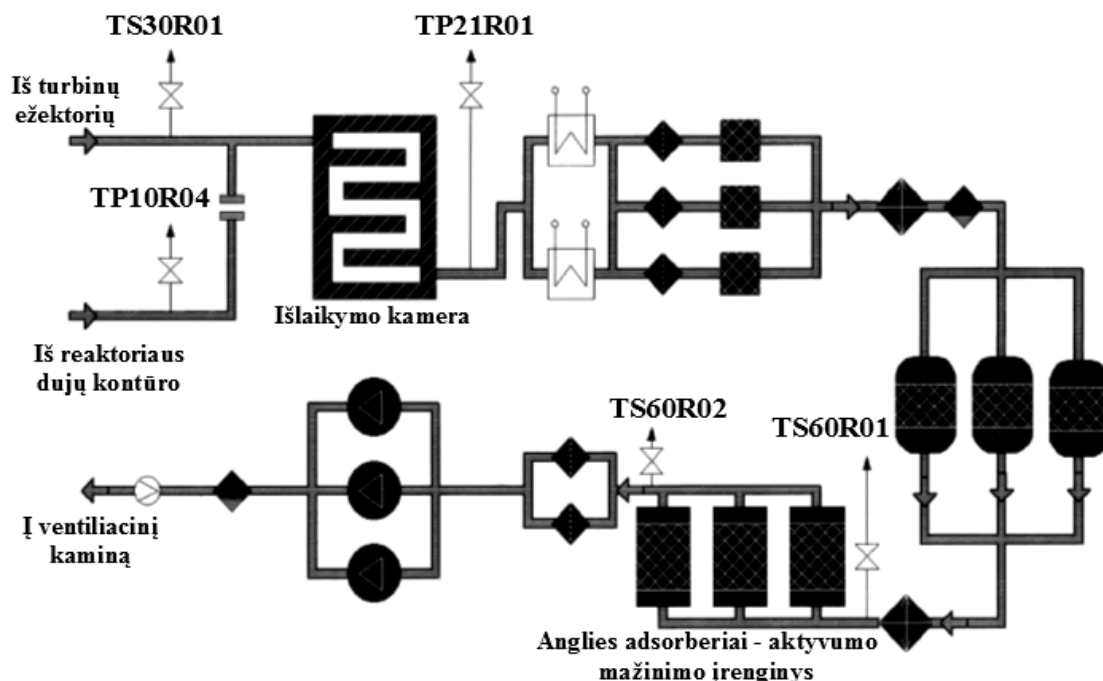


28 pav. AFA filtro pavyzdys.

Ignalinos AE reaktorių ventiliacinių kaminų ore aerozolio dalelių bandiniai buvo imami kasdien arba kas tris dienas (savaitgaliais) automatiniiais izokinetiniais ėmikliais įrengtais 90 m aukštyje ventiliacinio kamino vamzdyje. Oro debitas 1 ir 2 blokų ventiliaciniuose kaminuose buvo $(1,5-1,6) \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ir $(2,5-2,6) \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ 2007 metais, atitinkamai. Ventiliacinio oro debitas pro bandinių ėmimo sistemą buvo $60 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$. Aerozolio dalelių bandinių išplovimo tyrimams buvo atrenkami nuosekliai paimti bandiniai, atspindintys savaitės oro siurbimą pro filtrus. Radionuklidų aktyvumo koncentracijų išlėkose pro ventiliacinį kaminą registravimo riba gama spektrometriniu metodu yra $10 \mu\text{Bq m}^{-3}$ (bandinio matavimo laikas 90 000 s, pro filtrą prasiurbto oro tūris 600 m^3). Tipinė ^{137}Cs aktyvumo nustatymo bandinyje statistinė matavimo paklaida yra 5-10 %, ^{60}Co aktyvumo nustatymo bandinyje statistinė matavimo paklaida yra 10-20 %, ^{134}Cs ir ^{54}Mn aktyvumo nustatymo bandinyje statistinė matavimo paklaida yra 20-30 % (1σ pasikliautinis lygmuo).

Ignalinos AE 2 bloko reaktoriaus ventiliacinės sistemos ore buvo papildomai paimti aerozolio dalelių bandiniai 2008.04.22-24. Bandiniai buvo imami skirtingose Ignalinos AE reaktoriaus ventiliacinės sistemos dalyse: iki išlaikymo kameros (TS30R01) ir po išlaikymo kameros (TP21R01), iki anglies adsorberių (TS60R01) ir

po anglies adsorberių (TS60R02). Bandinių paėmimo Ignalinos AE reaktorių ventiliacinės sistemoje vietų išsidėstymas parodytas 29 pav.



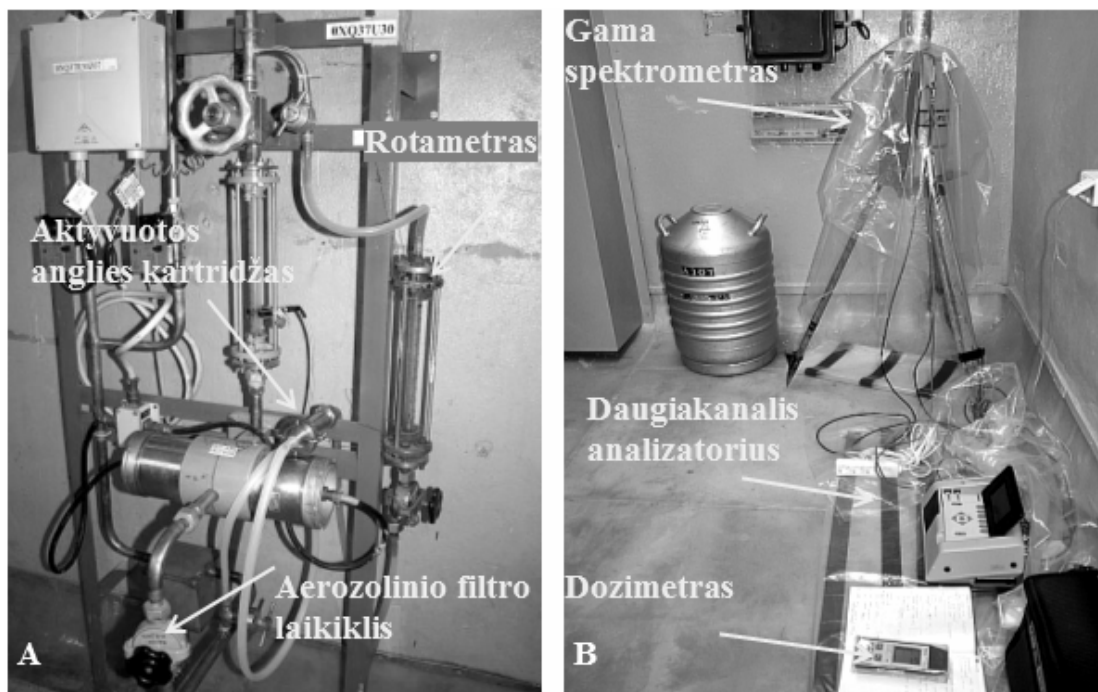
29 pav. Ignalinos AE 2 bloko reaktoriaus ventiliacinės sistemos oro aerozolio dalelių bandinių ėmimo vietos.

Ventiliacinio oro debitas aerozolio dalelių bandinių ėmimo metu buvo 10 l/min. Pro kiekvieną filtrą buvo prasiurbta 400 l ventiliacinio oro. 13 lentelėje pateikiamos Ignalinos AE 2 bloko reaktoriaus ventiliacinės sistemos ore paimtų aerozolio dalelių bandinių charakteristikos.

13 lentelė. Ignalinos AE 2 bloko reaktoriaus ventiliacinės sistemos ore 2008.04.23 paimtų aerozolio dalelių bandinių charakteristikos.

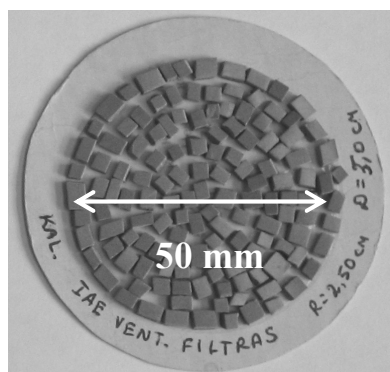
| Bandinio ėmimo vietos žymėjimas, pavadinimas ir patalpa | Bandinio ėmimo laikas |
|---|-----------------------|
| 2TS30R01 | 2008.04.23 |
| Prieš išlaikymo kamerą // 101/2, 010B2 | 08:28-09:08 |
| 2TS21R01 | 2008.04.23 |
| Po išlaikymo kameros // 101/2, 010B2 | 08:35-09:15 |
| 2TS60R01 | 2008.04.23 |
| Prieš anglies adsorberius // 101/2, 505B2 | 08:43-09:23 |
| 2TS60R02 | 2008.04.23 |
| Po anglies adsorberių // 101/2, 519B2 | 09:25-10:00 |

30 pav. pavaizduota Ignalinos AE ventiliacinės sistemos oro aerozolio dalelių bandinių ėmimo sistema (A) ir radionuklidų aktyvumo paimtuose aerozolio dalelių bandiniuose matavimo sistema (B).



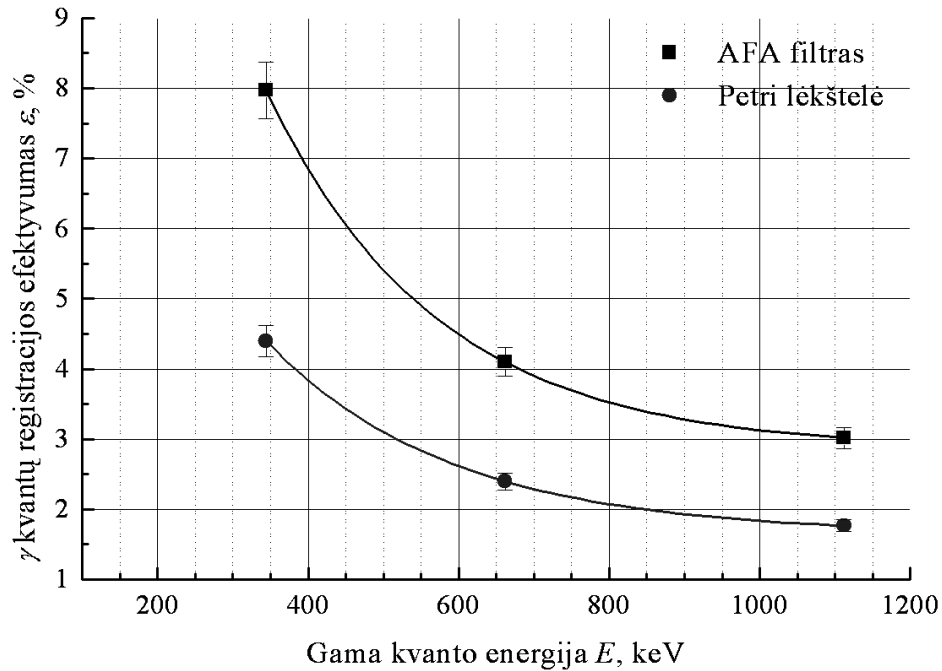
30 pav. Ignalinos AE ventiliacinės sistemos oro aerozolio dalelių bandinių ėmimo sistema (A) ir radionuklidų aktyvumo paimtuose aerozolio dalelių bandiniuose matavimo sistema (B).

Gama kvantų registravimo efektyvumas AFA filtro geometrijoje buvo įvertintas pagaminus kalibravimo šaltinį. Žinomo aktyvumo ^{137}Cs ir ^{152}Eu epoksidinės dervos plokštelės buvo priklijuotos ant kartoninio disko (31 pav.).



31 pav. Kalibravimo šaltinis gama kvantų registravimo efektyvumui AFA filtro geometrijoje nustatymui.

32 pav. pateikiami gama kvantų registravimo efektyvumai AFA filtro geometrijai ir Petri lėkštelės geometrijai. Petri lėkštelė buvo naudojama matuojant radionuklidų aktyvumus tirpaluose.



32 pav. Gama kvantų registravimo efektyvumai AFA filtro geometrijai (skersmuo $D = 50$ mm, $\rho \cong 0,9$ g cm⁻³) ir Petri lėkštelės geometrijai (plastikas, skersmuo $D = 85$ mm, $\rho \cong 0,9$ g cm⁻³, užpildymo skysčiu tūris 50 cm³).

Skirtingose sistemos „Ignalinos AE – aplinka“ vietose ant filtrų surinktų aerozolio dalelių, radionuklidų nešėjų, savybės buvo tiriamos taikant aukščiau aprašytą aerozolio dalelių bandinių išplovimo vandeniu metodiką.

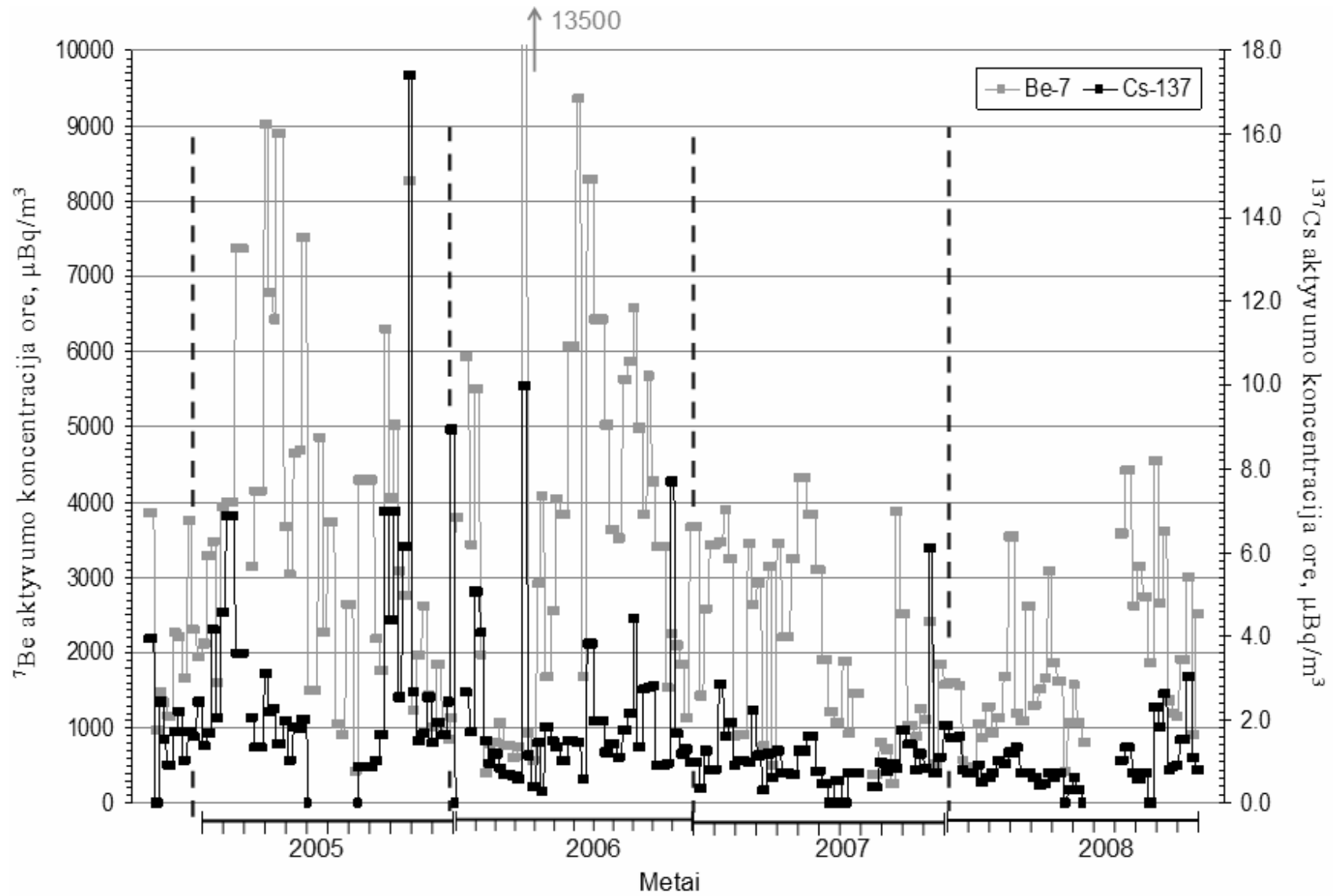
REZULTATAI

Eksperimentiniai darbo rezultatai yra radionuklidų aktyvumo koncentracijos pažemio ore bei iškritose regione ir radionuklidų aktyvumo koncentracijos Ignalinos AE ventiliacinės sistemos ore. Gauti aerozolio dalelių, surinktų ant filtrų, išplovimo rezultatai.

4.1 Radionuklidų aktyvumo koncentracijos pažemio ore Ignalinos AE aplinkoje

Ilgalaikiai ir nuolatiniai radionuklidų koncentracijų ore ir iškritose matavimų atominių elektrinių aplinkoje rezultatai padeda vertinti dirbtinių ilgaamžių radionuklidų šaltinių indėlių radionuklidų balansui atmosferoje ir prognozuoti galimų avarių atominėse elektrinėse padarinių pasekmes. Nuo 1978 metų Ignalinos AE poveikio zonoje Fizikos instituto geofizinėje stotyje nepertraukiamai vykdomi radionuklidų aktyvumo koncentracijų matavimai pažemio ore ir iškritose. Radionuklidų aktyvumo koncentracijų ore matavimo metodika su $0,1 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ jautrumu įgalina išmatuoti išlekiančių iš Ignalinos AE radionuklidų, kitų dirbtinių, emanacinių ir kosmogeninių radionuklidų aktyvumo koncentracijas pažemio ore. Darbe radionuklidų aktyvumo koncentracijų ore matavimai buvo tęsiami nuo 2004.10.15 iki 2009.01.02 (doktorantūros studijų metais).

Globaliai pasiskirsčiusio ^{137}Cs ir kosmogeninio ^7Be aktyvumo koncentracijų pažemio ore Ignalinos AE regione reikšmės pateiktos grafiškai 33 pav.



33 pav. ^7Be ir ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos pažemio ore Ignalinos AE regione 2004.10.15-2009.01.02.

^7Be aktyvumo koncentracijų ore padidėjimai stebimi pavasarį. Šie padidėjimai ryškūs 2005 ir 2006 metais. 2008 metais registruotas ^7Be aktyvumo koncentracijų ore padidėjimas rudenį. Tikriausiai, tai galima paaiškinti atmosferos cirkuliacijos pobūdžio kitimu 2007-2008 metais.

^{137}Cs gama spinduliavimas buvo registruotas beveik visuose pažemio oro aerolio dalelių bandiniuose, nors dalyje bandinių ^{137}Cs aktyvumai buvo žemiau registravimo ribos ($0,1 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$). Dauguma ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore verčių svyravo intervale nuo mažiausiai registruojamos aktyvumo koncentracijos ore iki $4,0 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Stebėti du ryškūs ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore maksimumai sausio-vasario mėnesiais ir rugsėjo-spalio mėnesiais (33 pav.).

Kasmet registruojami šuoliški ^{137}Cs koncentracijų ore padidėjimai, kurie nesutampa su Ignalinos AE pasigaminančių ^{60}Co ir ^{54}Mn aktyvumo koncentracijos pažemio ore registravimo atvejais (14 lentelė). Lentelėje pateiktos aerolio filtrų keitimo datos žymi vieno pažemio oro aerolio dalelių bandinio ekspozicijos pabaigą ir kito pradžia.

14 lentelė. ^7Be , ^{137}Cs , ^{60}Co ir ^{54}Mn aktyvumo koncentracijos pažemio ore Ignalinos AE regione 2004.10.15-2009.01.02.

| Nr. | Nr. kataloge | Bandinio ėmimo laikotarpis | Radionuklido aktyvumo koncentracija ore, $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ | | | |
|-----|--------------|----------------------------|--|-------------------|------------------|------------------|
| | | | ^7Be | ^{137}Cs | ^{60}Co | ^{54}Mn |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 2933 | 2004.10.15 - 24 | 3840 | 3,9 | < 0,1 | < 0,1 |
| 2 | 2934 | 2004.10.24 - 31 | 960 | < 0,1 | 6,4 | < 0,1 |
| 3 | 2935 | 2004.10.31 - 11.07 | 1470 | 2,4 | 1,8 | < 0,1 |
| 4 | 2936 | 2004.11.07 - 11 | 1330 | 1,5 | 1,7 | 0,9 |
| 5 | 2937 | 2004.11.11 - 20 | 1160 | 0,9 | < 0,1 | < 0,1 |
| 6 | 2938 | 2004.11.20 - 27 | 2250 | 1,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 7 | 2939 | 2004.11.27 - 12.04 | 2195 | 2,2 | 0,7 | < 0,1 |
| 8 | 2940 | 2004.12.04 - 11 | 1650 | 1,0 | 0,7 | < 0,1 |
| 9 | 2941 | 2004.12.11 - 18 | 3740 | 1,7 | 0,8 | < 0,1 |
| 10 | 2942 | 2004.12.18 - 25 | 2300 | 1,6 | < 0,1 | < 0,1 |
| 11 | 2943 | 2004.12.25 - 2005.01.02 | 1950 | 2,4 | 0,4 | < 0,1 |
| 12 | 2944 | 2005.01.02 - 08 | 2120 | 1,4 | 2,0 | < 0,1 |
| 13 | 2945 | 2005.01.08 - 16 | 3290 | 1,6 | 1,1 | < 0,1 |
| 14 | 2946 | 2005.01.16 - 22 | 3465 | 4,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 15 | 2947 | 2005.01.22 - 29 | 1590 | 2,0 | 0,5 | < 0,1 |
| 16 | 2948 | 2005.01.29 - 02.05 | 3940 | 4,5 | 0,7 | < 0,1 |
| 17 | 2949 | 2005.02.05 - 19 | 4000 | 6,9 | 0,4 | 0,2 |
| 18 | 2950 | 2005.02.19 - 03.05 | 7370 | 3,6 | 2,2 | < 0,1 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|-------|----------------------------|------|-------|-------|-------|
| 19 | 2951 | 2005.03.13 - 19 | 3140 | 2,0 | 0,6 | < 0,1 |
| 20 | 2952 | 2005.03.19 - 04.02 | 4145 | 1,3 | < 0,1 | < 0,1 |
| 21 | 2953 | 2005.04.02 - 09 | 9010 | 3,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 22 | 2954 | 2005.04.09 - 16 | 6775 | 2,2 | 0,4 | < 0,1 |
| 23 | 2955 | 2005.04.16 - 21 | 6430 | 2,2 | 0,8 | < 0,1 |
| 24 | 2956 | 2005.04.21 - 05.01 | 8890 | 1,4 | 1,7 | 1,1 |
| 25 | 2957 | 2005.05.01 - 08 | 3670 | 1,9 | 1,1 | < 0,1 |
| 26 | 2958 | 2005.05.08 - 15 | 3040 | 1,0 | < 0,1 | < 0,1 |
| 27 | 2959 | 2005.05.15 - 22 | 4650 | 1,8 | 0,7 | < 0,1 |
| 28 | 2960 | 2005.05.22 - 05.27 | 4680 | 1,8 | 0,8 | < 0,1 |
| 29 | 2961 | 2005.05.27 - 06.05 | 5710 | 1,3 | < 0,1 | < 0,1 |
| 30 | 2962 | 2005.06.05 - 06.20 | 1310 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 31 | 2963 | 2005.06.20 - 06.27 | 4260 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 32 | 2964 | 2005.06.27 - 07.04 | 2020 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 33 | 2965 | 2005.07.04 - 15 | 2835 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 34 | 2966 | 2005.07.15 - 24 | 860 | < 0,1 | < 0,1 | 0,1 |
| 35 | 2967 | 2005.07.24 - 31 | 730 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 36 | 2968 | 2005.07.31 - 08.11 | 2220 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 37 | 2969 | 2005.08.11 - 18 | 380 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 38 | 2970 | 2005.08.18 - 09.11 | 3600 | 0,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 39 | 2971 | 2005.09.11 - 18 | 1790 | 0,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 40 | 2972 | 2005.09.18 - 26 | 1510 | 1,2 | < 0,1 | < 0,1 |
| 41 | 2973 | 2005.09.26 - 10.02 | 5170 | 5,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 42 | 2974 | 2005.10.02 - 09 | 4050 | 4,4 | 0,9 | 0,6 |
| 43 | 2975 | 2005.10.09 - 15 | 5030 | 6,8 | 0,8 | < 0,1 |
| 44 | 2976 | 2005.10.15 - 22 | 3080 | 2,5 | < 0,1 | < 0,1 |
| 45 | 2977 | 2005.10.22 - 30 | 2760 | 6,2 | < 0,1 | < 0,1 |
| 46 | 2978 | 2005.10.30 - 11.05 | 8260 | 17,4 | < 0,1 | < 0,1 |
| 47 | 2979 | 2005.11.05 - 12 | 1230 | 2,6 | < 0,1 | < 0,1 |
| 48 | 2980 | 2005.11.12 - 20 | 1970 | 1,5 | < 0,1 | < 0,1 |
| 49 | 2981 | 2005.11.20 - 26 | 2620 | 1,7 | 1,5 | < 0,1 |
| 50 | 2982 | 2005.11.26 - 12.04 | 1420 | 2,5 | < 0,1 | < 0,1 |
| 51 | 2983a | 2005.12.04 - 10 | 1010 | 1,4 | < 0,1 | < 0,1 |
| 52 | 2983b | 2005.12.10 - 18 | 1850 | 1,9 | < 0,1 | < 0,1 |
| 53 | 2984 | 2005.12.18 - 27 | 890 | 1,6 | < 0,1 | < 0,1 |
| 54 | 2985 | 2005.12.27 - 31 | 850 | 2,4 | 0,5 | < 0,1 |
| 55 | 2986 | 2005.12.31 - 2006.01.07 | 1130 | 8,9 | < 0,1 | < 0,1 |
| 56 | 2987 | 2006.01.07 - 14 | 3790 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 57 | 2989 | 2006.01.21 - 28 | 5930 | 2,6 | < 0,1 | < 0,1 |
| 58 | 2990 | 2006.01.28 - 02.04 | 3430 | 1,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 59 | 2991 | 2006.02.04 - 12 | 5500 | 5,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 60 | 2992 | 2006.02.12 - 18 | 1970 | 4,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 61 | 2993 | 2006.02.18 - 25 | 390 | 1,5 | < 0,1 | < 0,1 |
| 62 | 2994 | 2006.02.25 - 03.04 | 770 | 1,0 | < 0,1 | < 0,1 |
| 63 | 2995 | 2006.03.04 - 12 | 790 | 1,2 | 0,3 | < 0,1 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----|-------|--------------------|-------|------|-------|-------|
| 64 | 2996 | 2006.03.12 - 18 | 1070 | 0,8 | 0,5 | < 0,1 |
| 65 | 2997 | 2006.03.18 - 04.01 | 750 | 0,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 66 | 2998 | 2006.04.01 - 08 | 600 | 0,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 67 | 2999 | 2006.04.08 - 15 | 730 | 0,6 | < 0,1 | 0,5 |
| 68 | 3000 | 2006.04.15 - 23 | 13500 | 10,0 | < 0,1 | < 0,1 |
| 69 | 3001 | 2006.04.23 - 29 | 920 | 1,1 | 0,5 | < 0,1 |
| 70 | 3002 | 2006.04.29 - 05.06 | 560 | 0,4 | 1,4 | < 0,1 |
| 71 | 3003 | 2006.05.06 - 13 | 2900 | 1,4 | < 0,1 | < 0,1 |
| 72 | 3004 | 2006.05.13 - 18 | 4070 | 0,3 | < 0,1 | < 0,1 |
| 73 | 3005 | 2006.05.18 - 27 | 1680 | 1,8 | < 0,1 | < 0,1 |
| 74 | 3006 | 2006.05.27 - 06.03 | 2560 | 1,5 | < 0,1 | < 0,1 |
| 75 | 3007 | 2006.06.03 - 10 | 4040 | 1,3 | < 0,1 | < 0,1 |
| 76 | 3008 | 2006.06.10 - 21 | 3820 | 1,0 | < 0,1 | < 0,1 |
| 77 | 3009 | 2006.06.21 - 07.03 | 6070 | 1,5 | 0,5 | 0,3 |
| 78 | 3010 | 2006.07.03 - 11 | 9350 | 1,4 | 0,2 | < 0,1 |
| 79 | 3011 | 2006.07.11 - 19 | 1670 | 0,6 | < 0,1 | < 0,1 |
| 80 | 3012 | 2006.07.19 - 29 | 8280 | 3,8 | 0,7 | < 0,1 |
| 81 | 3013 | 2006.07.29 - 08.14 | 6430 | 1,9 | < 0,1 | < 0,1 |
| 82 | 3014 | 2006.08.14 - 21 | 5020 | 1,2 | < 0,1 | < 0,1 |
| 83 | 3015 | 2006.08.21 - 09.01 | 3630 | 1,4 | 0,9 | 1,0 |
| 84 | 3016 | 2006.09.01 - 09 | 3530 | 1,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 85 | 3017 | 2006.09.09 - 17 | 5631 | 1,8 | < 0,1 | < 0,1 |
| 86 | 3018 | 2006.09.17 - 25 | 5870 | 2,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 87 | 3019 | 2006.09.25 - 30 | 6570 | 4,4 | < 0,1 | < 0,1 |
| 88 | 3020 | 2006.09.30 - 10.08 | 4970 | 1,3 | < 0,1 | < 0,1 |
| 89 | 3021 | 2006.10.08 - 10.15 | 3820 | 2,6 | < 0,1 | < 0,1 |
| 90 | 3022 | 2006.10.15 - 21 | 5660 | 2,7 | 0,3 | < 0,1 |
| 91 | 3023 | 2006.10.21 - 28 | 4280 | 2,8 | 0,1 | < 0,1 |
| 92 | 3024 | 2006.10.28 - 11.12 | 3410 | 0,9 | 0,3 | 0,3 |
| 93 | 3025 | 2006.11.12 - 18 | 1530 | 0,9 | 0,3 | < 0,1 |
| 94 | 3026 | 2006.11.18 - 25 | 2240 | 7,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 95 | 3027 | 2006.11.25 - 12.02 | 2100 | 1,7 | 0,3 | < 0,1 |
| 96 | 3028 | 2006.12.02 - 08 | 1850 | 1,2 | 0,4 | < 0,1 |
| 97 | 3029 | 2006.12.08 - 16 | 1130 | 1,3 | 0,2 | 0,2 |
| 98 | 3030 | 2006.12.16 - 30 | 3660 | 1,0 | < 0,1 | < 0,1 |
| 99 | 3031 | 2006.12.30 - 01.06 | 1420 | 0,3 | < 0,1 | < 0,1 |
| 100 | 3032 | 2007.01.06 - 14 | 2580 | 1,3 | < 0,1 | < 0,1 |
| 101 | 3033 | 2007.01.14 - 27 | 3430 | 0,8 | 0,3 | < 0,1 |
| 102 | 3034 | 2007.01.27 - 02.04 | 3460 | 2,8 | < 0,1 | < 0,1 |
| 103 | 3035 | 2007.02.04 - 11 | 3890 | 1,6 | 0,7 | < 0,1 |
| 104 | 3036 | 2007.02.11 - 18 | 3240 | 1,9 | < 0,1 | 0,3 |
| 105 | 3037 | 2007.02.18 - 25 | 870 | 0,9 | < 0,1 | < 0,1 |
| 106 | 3038 | 2007.02.25 - 03.10 | 900 | 1,0 | < 0,1 | < 0,1 |
| 107 | 3039A | 2007.03.10 - 17 | 3450 | 1,0 | < 0,1 | < 0,1 |
| 108 | 3039B | 2007.03.17 - 24 | 2630 | 2,2 | < 0,1 | < 0,1 |
| 109 | 3040 | 2007.03.24 - 31 | 2900 | 1,1 | < 0,1 | < 0,1 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----|------|----------------------------|------|-------|-------|-------|
| 110 | 3041 | 2007.03.31 - 04.09 | 745 | 0,3 | < 0,1 | < 0,1 |
| 111 | 3042 | 2007.04.09 - 15 | 3140 | 1,2 | < 0,1 | < 0,1 |
| 112 | 3043 | 2007.04.15 - 22 | 510 | 0,6 | 0,1 | < 0,1 |
| 113 | 3044 | 2007.04.22 - 30 | 3440 | 1,2 | 0,8 | < 0,1 |
| 114 | 3045 | 2007.04.30 - 05.13 | 2190 | 0,7 | 0,2 | 0,3 |
| 115 | 3046 | 2007.05.13 - 23 | 3240 | 0,7 | 0,2 | < 0,1 |
| 116 | 3047 | 2007.05.23 - 06.06 | 4300 | 1,2 | < 0,1 | < 0,1 |
| 117 | 3048 | 2007.06.06 - 18 | 3830 | 1,6 | 0,5 | < 0,1 |
| 118 | 3049 | 2007.06.18 - 28 | 3110 | 0,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 119 | 3050 | 2007.06.28 - 07.07 | 1910 | 0,5 | < 0,1 | < 0,1 |
| 120 | 3051 | 2007.07.07 - 17 | 1210 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 121 | 3052 | 2007.07.17 - 27 | 1080 | 0,5 | < 0,1 | < 0,1 |
| 122 | 3053 | 2007.07.27 - 08.05 | 1880 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 123 | 3054 | 2007.08.05 - 12 | 930 | 0,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 124 | 3055 | 2007.08.12 - 24 | 1450 | 0,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 125 | 3057 | 2007.09.09 - 19 | 370 | 0,4 | < 0,1 | < 0,1 |
| 126 | 3058 | 2007.09.19 - 27 | 790 | 1,0 | < 0,1 | < 0,1 |
| 127 | 3059 | 2007.09.27 - 10.06 | 715 | 0,8 | < 0,1 | < 0,1 |
| 128 | 3060 | 2007.10.06 - 14 | 250 | 0,95 | < 0,1 | < 0,1 |
| 129 | 3060 | 2007.10.06 - 14 | 250 | 0,95 | < 0,1 | < 0,1 |
| 130 | 3061 | 2007.10.14 - 20 | 3880 | 0,8 | < 0,1 | < 0,1 |
| 131 | 3062 | 2007.10.20 - 30 | 2500 | 1,7 | < 0,1 | 0,3 |
| 132 | 3063 | 2007.10.30 - 11.11 | 1030 | 1,4 | < 0,1 | < 0,1 |
| 133 | 3064 | 2007.11.11 - 17 | 890 | 0,8 | 0,5 | 0,3 |
| 134 | 3065 | 2007.11.17 - 24 | 1250 | 1,2 | < 0,1 | < 0,1 |
| 135 | 3066 | 2007.11.24 - 12.01 | 1115 | 0,8 | < 0,1 | < 0,1 |
| 136 | 3067 | 2007.12.01 - 08 | 2400 | 6,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 137 | 3068 | 2007.12.08 - 16 | 530 | 0,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 138 | 3069 | 2007.12.16 - 23 | 1850 | 1,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 139 | 3070 | 2007.12.23 - 31 | 1570 | 1,8 | < 0,1 | < 0,1 |
| 140 | 3071 | 2007.12.31 - 2008.01.13 | 1590 | 1,55 | < 0,1 | < 0,1 |
| 141 | 3072 | 2008.01.13 - 19 | 1550 | 1,6 | 0,5 | < 0,1 |
| 142 | 3073 | 2008.01.19 - 25 | 560 | 0,8 | < 0,1 | < 0,1 |
| 143 | 3074 | 2008.01.25 - 02.09 | 490 | 0,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 144 | 3075 | 2008.02.09 - 16 | 1040 | 0,9 | < 0,1 | < 0,1 |
| 145 | 3076 | 2008.02.16 - 23 | 860 | 0,5 | < 0,1 | < 0,1 |
| 146 | 3077 | 2008.02.23 - 03.02 | 1275 | 0,6 | < 0,1 | < 0,1 |
| 147 | 3078 | 2008.03.02 - 09 | 920 | 0,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 148 | 3079 | 2008.03.09 - 19 | 1120 | 1,0 | 0,3 | < 0,1 |
| 149 | 3080 | 2008.03.19 - 28 | 1680 | 0,95 | < 0,1 | 0,3 |
| 150 | 3081 | 2008.03.28 - 04.06 | 3530 | 1,2 | < 0,1 | < 0,1 |
| 151 | 3082 | 2008.04.06 - 13 | 1190 | 1,3 | < 0,1 | < 0,1 |
| 152 | 3083 | 2008.04.13 - 21 | 1085 | 0,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 153 | 3084 | 2008.04.21 - 05.01 | 2610 | 0,7 | 0,3 | < 0,1 |
| 154 | 3085 | 2008.05.01 - 10 | 1300 | 0,6 | < 0,1 | < 0,1 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----|-------|----------------------------|------|-------|-------|-------|
| 155 | 3086 | 2008.05.10 - 17 | 1500 | 0,4 | < 0,1 | < 0,1 |
| 156 | 3087 | 2008.05.17 - 23 | 1660 | 0,45 | 0,4 | < 0,1 |
| 157 | 3088 | 2008.05.23 - 30 | 3080 | 0,7 | 0,4 | < 0,1 |
| 158 | 3089 | 2008.05.30 - 06.06 | 1855 | 0,6 | < 0,1 | < 0,1 |
| 159 | 3090 | 2008.06.06 - 15 | 1610 | 0,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 160 | 3091 | 2008.06.15 - 21 | 420 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 161 | 3092 | 2008.06.21 - 29 | 1070 | 0,3 | < 0,1 | < 0,1 |
| 162 | 3093 | 2008.06.29 - 07.05 | 1560 | 0,6 | 0,3 | < 0,1 |
| 163 | 3094 | 2008.07.05 - 12 | 1065 | 0,3 | < 0,1 | < 0,1 |
| 164 | 3095 | 2008.07.12 - 22 | 790 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 165 | 3096 | 2008.09.05 - 13 | 3575 | 1,0 | < 0,1 | < 0,1 |
| 166 | 3097 | 2008.09.13 - 24 | 4420 | 1,3 | < 0,1 | < 0,1 |
| 167 | 3098 | 2008.09.24 - 30 | 2620 | 0,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 168 | 3099A | 2008.09.30 - 10.09 | 3130 | 0,55 | 0,5 | < 0,1 |
| 169 | 3099B | 2008.10.09 - 18 | 2740 | 0,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 170 | 3100 | 2008.10.18 - 25 | 1860 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 171 | 3101 | 2008.10.25 - 11.02 | 4550 | 2,3 | < 0,1 | < 0,1 |
| 172 | 3102 | 2008.11.02 - 08 | 2660 | 1,8 | 0,5 | < 0,1 |
| 173 | 3103 | 2008.11.08 - 15 | 3590 | 2,6 | 0,6 | < 0,1 |
| 174 | 3104 | 2008.11.15 - 22 | 1370 | 0,8 | < 0,1 | < 0,1 |
| 175 | 3105 | 2008.11.22 - 26 | 1860 | 2,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 176 | 3106 | 2008.11.26 - 12.02 | 1270 | 1,0 | < 0,1 | < 0,1 |
| 177 | 3107 | 2008.12.02 - 13 | 2100 | 1,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 178 | 3108 | 2008.12.13 - 20 | 3440 | 3,3 | < 0,1 | < 0,1 |
| 179 | 3109 | 2008.12.20 - 26 | 920 | 1,2 | 0,6 | < 0,1 |
| 180 | 3110 | 2008.12.26 - 2009.01.02 | 2855 | 1,0 | < 0,1 | < 0,1 |

2005-2008 metais Ignalinos AE pagaminto ^{60}Co gama spinduliavimas registruotas 50, o ^{54}Mn – 14 bandiniuose. Laikome, kad ^{60}Co ir ^{54}Mn patenka į FI stotyje surinktus filtrus, kai bandinio ėmimo laikotarpiu stotis atsiduria pavėjinėje atominės elektrinės pusėje. Didžiausia ^{60}Co koncentracija ore buvo užregistruota 2005.02.19-03.05 ($2,2 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$), ^{54}Mn – 2005.04.21-05.01 ($1,1 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$). Pastaraisiais metais stebima ^{60}Co ir ^{54}Mn aktyvumo koncentracijų ore mažėjimo tendencija. Tikriausiai, tai susiję su Ignalinos AE 1 bloko reaktoriaus sustabdymu 2005 metais.

Atskiros radionuklidų aktyvumo koncentracijų ore reikšmės per ilgesnį laikotarpį svyruoja dėl įvairių faktorių, daugelio iš kurių poveikį sunku įvertinti, ir gali būti vertinamos kaip atsitiktiniai dydžiai. Ilgamečių radionuklidų aktyvumo koncentracijų matavimų rezultatų vertinimą tikslinga atlikti, aprašant radionuklidų aktyvumo koncentracijų ore pasiskirstymus. Radionuklidų aktyvumo koncentracijų

ore kitimo diapazonas dalinamas į lygius intervalus ir suskaičiuojamas į kiekvieną iš intervalų patenkantis metų bėgyje matuotų radionuklidų aktyvumo koncentracijų ore skaičius. Normuojant į bendrą rezultatų skaičių gaunamas radionuklido aktyvumo koncentracijų ore pasiskirstymo intervaluose tikimybių tankio pasiskirstymas. Dažniausiai gaunamas asimetrinis pasiskirstymas, kuris gali būti aprašomas logaritminiu normaliuoju dėsnio:

$$f(x) = \frac{A}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - x_c)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (15)$$

Kai radionuklido aktyvumo koncentracija ore yra artima minimaliam išmatuojamam dydžiui (tokios yra ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore) ir dalyje bandinių jo gama spinduliavimas neregistruojamas, naudojame nupjautinį normalųjį pasiskirstymą:

$$f(x) = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - x_c)^2}{\sigma^2}\right], \quad (16)$$

čia $f(x)$ – radionuklido aktyvumo koncentracijų ore pasiskirstymo intervaluose tankis, x_c ir σ – pasiskirstymo parametrai (σ – radionuklido aktyvumo koncentracijų ore standartinis nuokrypis), A – koeficientas, parenkamas iš normavimo sąlygų.

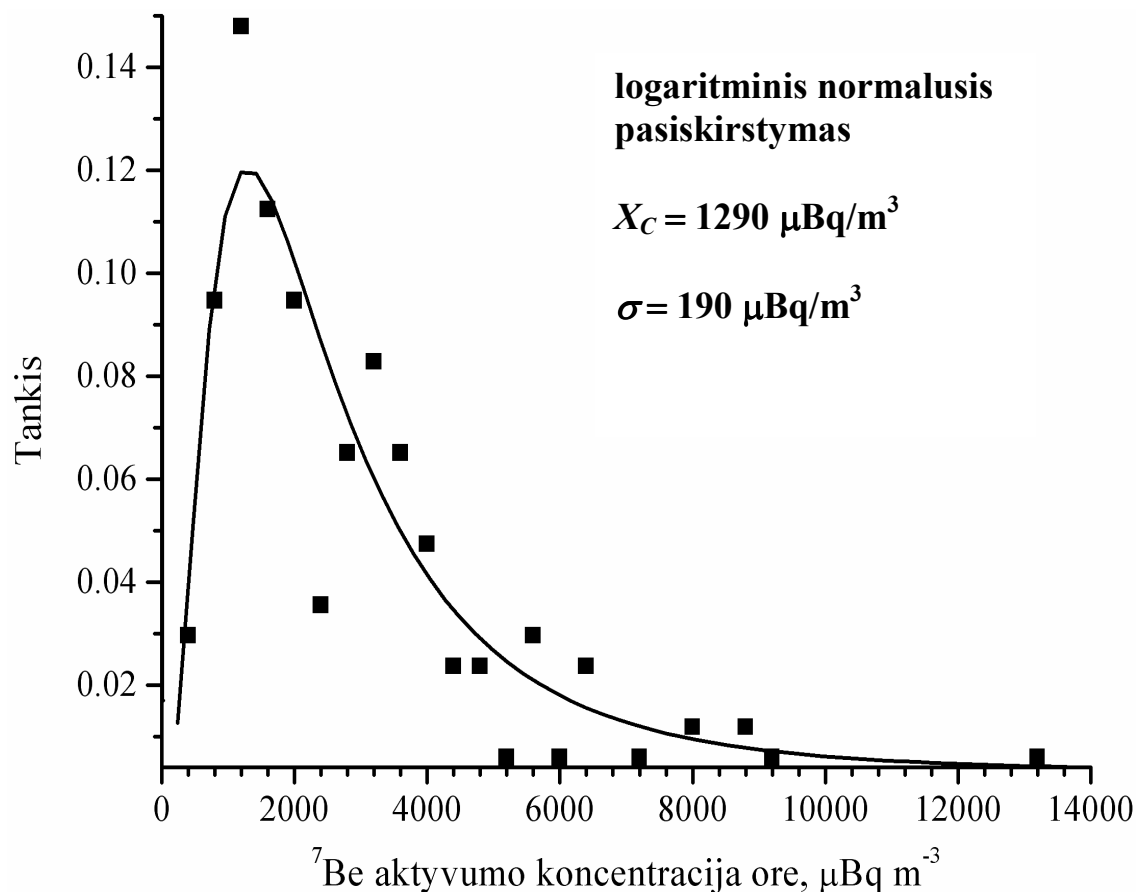
^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore pasiskirstymo aprašymui normalusis pasiskirstymas tinka geriau, nes aplinkoje yra daug skirtingų radionuklidų šaltinių.

Labiausiai tikėtina radionuklido aktyvumo koncentracijos ore reikšmė X_C :

$$X_C = \exp(x_c - \sigma^2), \quad (17)$$

Kosmogeninio ^7Be gama spinduliavimas buvo registruotas visuose pažemio oro aerozolio dalelių bandiniuose. ^7Be aktyvumo koncentracijos ore svyravo intervale 250-4000 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Didžiausia ^7Be aktyvumo koncentracija ore buvo užregistruota 2006.04.15-23 (13500 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$). ^7Be aktyvumo koncentracijų pasiskirstymų

skaičiavimas realizuotas Origin programinio paketo aplinkoje. Programa paskirsto sąrašą pateikiamas radionuklido koncentracijų ore reikšmes į parinktus intervalus, suskaičiuoja maksimaliai artimai atitinkančią taškus lognormaliojo pasiskirstymo kreivę ir įvertina radionuklido aktyvumo koncentracijų ore pasiskirstymo tankio parametrus. ${}^7\text{Be}$ aktyvumo koncentracijų ore 2005-2008 metais pasiskirstymas ir pasiskirstymo aproksimacija logaritminiu normaliuoju dėsnio pateikti 34 pav.

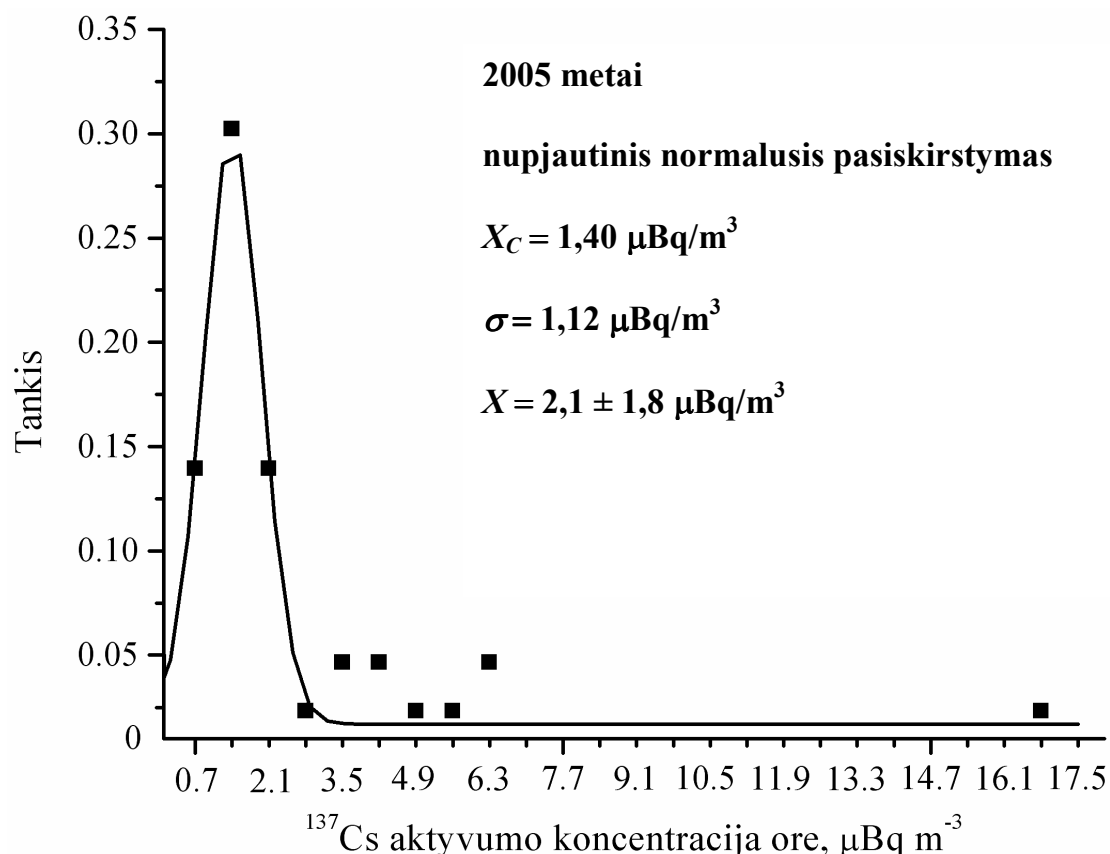


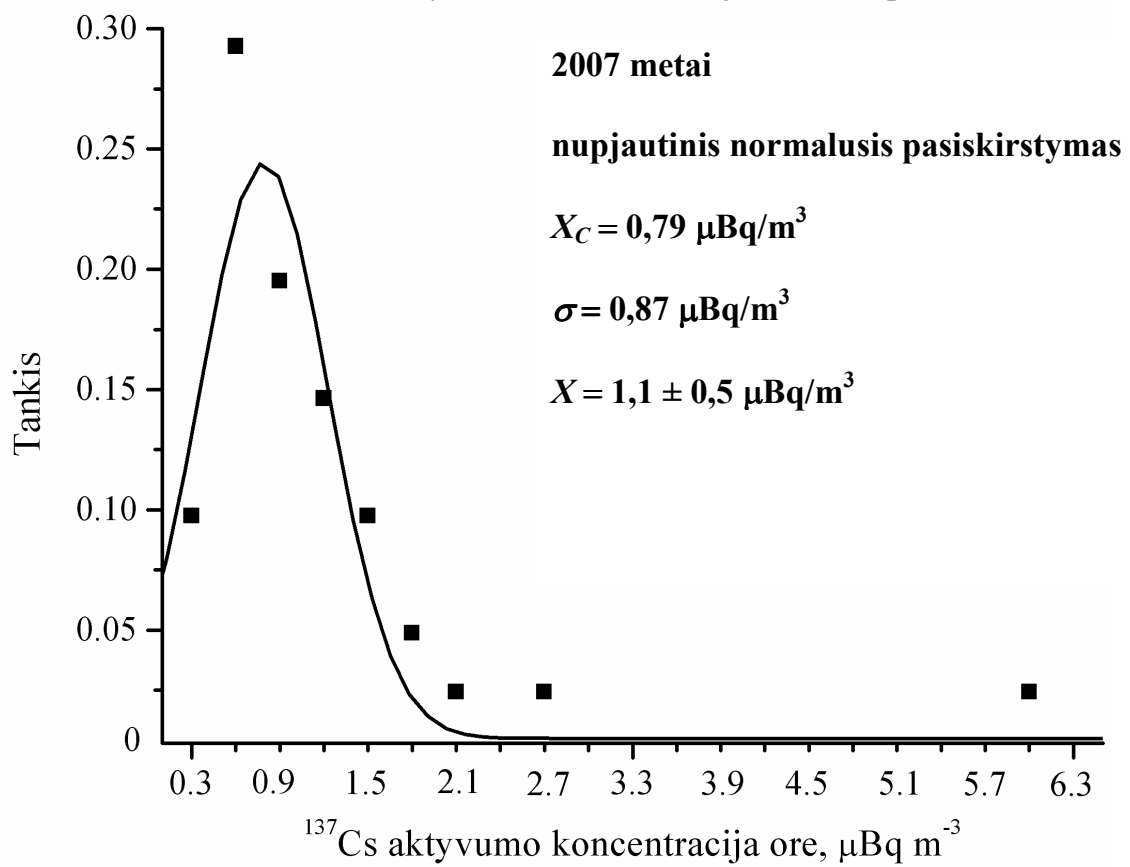
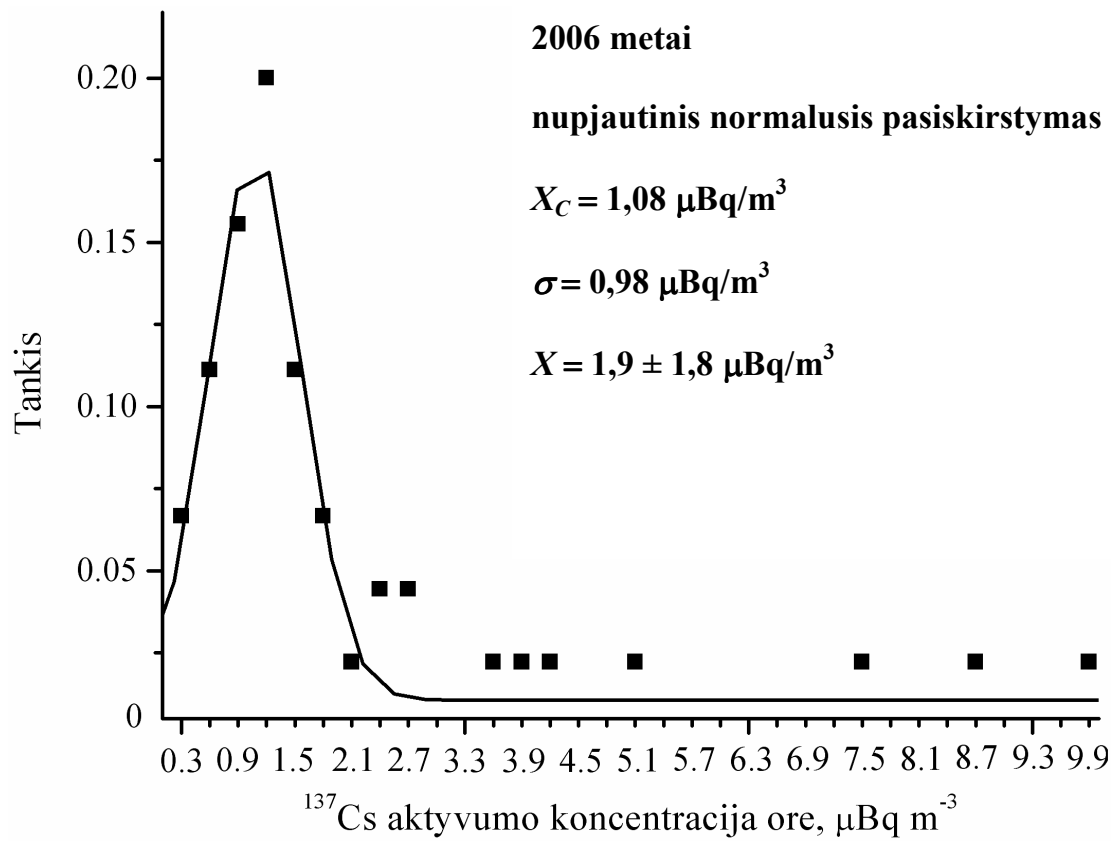
34 pav. ${}^7\text{Be}$ aktyvumo koncentracijų ore Ignalinos AE regione pasiskirstymas 2005-2008 metais (taškai), aproksimuotas logaritminiu normaliuoju dėsnio. X_c – labiausiai tikėtina ${}^7\text{Be}$ aktyvumo koncentracijos ore reikšmė ($\mu\text{Bq/m}^3$), σ – pasiskirstymo parametras (radionuklido aktyvumo koncentracijų ore standartinis nuokrypis) ($\mu\text{Bq/m}^3$).

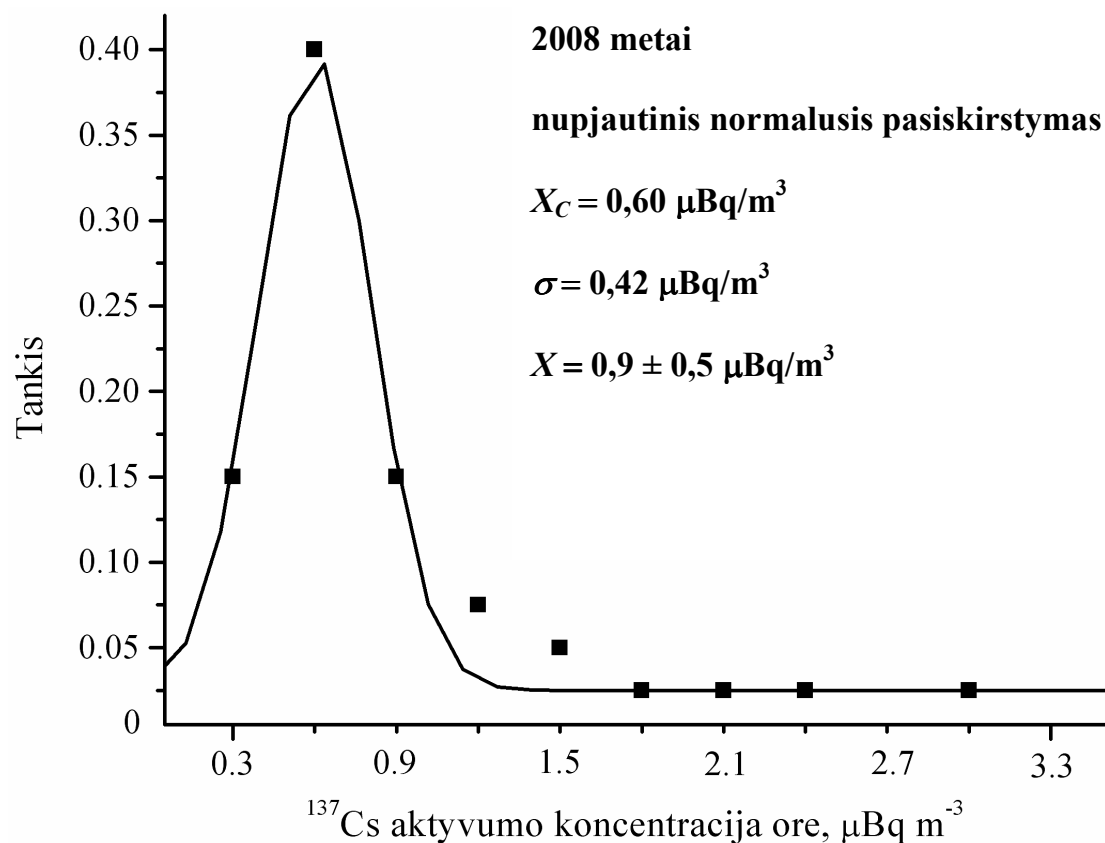
Labiausiai tikėtina ${}^7\text{Be}$ aktyvumo koncentracijos reikšmė ore 2005-2008 metais gauta $1290 \pm 190 \mu\text{Bq/m}^3$. Kosmogeninio ${}^7\text{Be}$ aktyvumo koncentracijų vertes ir pasiskirstymą laiko bėgyje vidutinėse platumose lemia tropopauzės aukščio svyravimai, aerolio dalelių, ${}^7\text{Be}$ nešėjų, išplovimas krituliais, Saulės aktyvumo

kaita ir atmosferos cirkuliacijos ypatumai. Vidutinė ^7Be aktyvumo koncentracija pažemio ore, tikriausiai, atspindi minėtų faktorių poveikį, tačiau priežastiniai ryšiai čia dar neaiškūs. Gautus rezultatus galime palyginti su ^7Be aktyvumo koncentracijų ore matavimo rezultatais, gautais beveik prieš tris dešimtmečius. Labiausiai tikėtina ^7Be aktyvumo koncentracijos reikšmė ore 1978-1983 metais buvo $1620 \pm 420 \mu\text{Bq/m}^3$ [14]. Kaip matyti, labiausiai tikėtina ^7Be aktyvumo koncentracijos reikšmė ore prieš tris dešimtmečius buvo didesnė nei 2005-2008 metais. Šis skirtumas yra statistiškai reikšmingas ir gali būti sąlygotas antropogeninio poveikio klimatui.

^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore pasiskirstymai atskirais 2005-2008 metais buvo aprašyti nupjautiniu normaliuoju dėsnio, nes kasmet stebime atvejus, kai radionuklido aktyvumo koncentracija ore buvo žemiau registravimo ribos. Origin programos aplinkoje gauti per metus išmatuotų koncentracijų pasiskirstymai ir vidutinių (aritmetinių ir labiausiai tikėtinių) metinių aktyvumo koncentracijų reikšmės pateikti 35 pav.







35 pav. ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore Ignalinos AE regione pasiskirstymas 2005-2008 metais (taškai), aproksimuotas nupjautiniu normaliuoju dėsnio. X_c – labiausiai tikėtina ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore reikšmė ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$), σ – pasiskirstymo parametras (radionuklido aktyvumo koncentracijų ore standartinis nuokrypis) ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$), X – ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore aritmetinis vidurkis ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$).

Skaičiuojant metinius aritmetinius ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore vidurkius, Origin programos aplinkoje atmetama didžiausia ir mažiausia ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos reikšmė. Mažiau registravimo ribos ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų reikšmės prilyginamos nuliui ir, vertinant ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore vidurkius, įskaičiuotas jų skaičius. Vidutinių ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore įvertinimo rezultatai pateikti 15 lentelėje.

15 lentelė. Vidutinės aritmetinės ir labiausiai tikėtinos ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore Ignalinos AE regione 2005-2008 metais.

| Metai | ^{137}Cs aktyvumo koncentracija ore, $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ | |
|-------|---|---------------------------|
| | Vidutinė aritmetinė X | Labiausiai tikėtina X_C |
| 2005 | $2,1 \pm 1,8$ | $1,4 \pm 1,1$ |
| 2006 | $1,9 \pm 1,8$ | $1,1 \pm 1,0$ |
| 2007 | $1,1 \pm 0,5$ | $0,8 \pm 0,9$ |
| 2008 | $0,9 \pm 0,5$ | $0,6 \pm 0,4$ |

Kaip matyti, labiausiai tikėtinos ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore reikšmės ir jų standartiniai nuokrypiai mažesnės nei vidutinės aritmetinės reikšmės. Šie rezultatai panaudojami tęsiant vidutinių metinių ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų pažemio ore eigą.

4.2 ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų pažemio ore eiga Ignalinos AE regione 1978-2008 metais

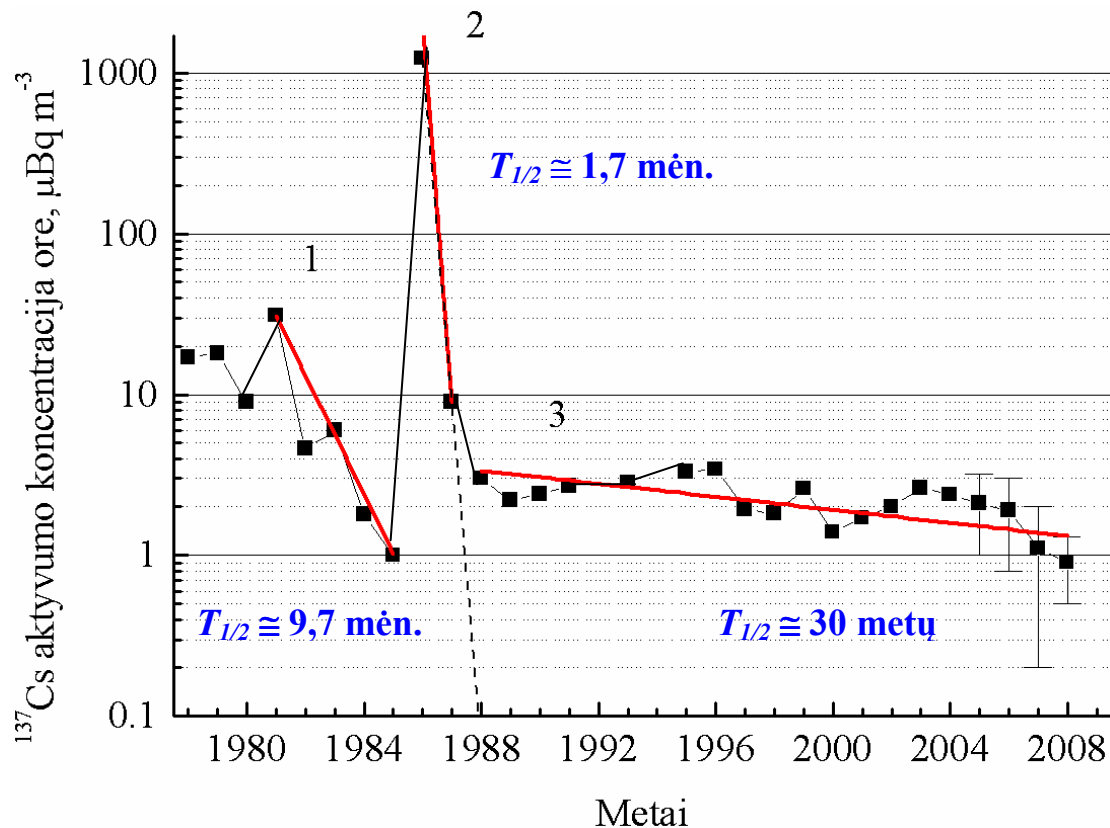
Darbe keturis metus vykdyti radionuklidų aktyvumo koncentracijų ore matavimai yra tęsinys toje pat vietoje, analogiška metodika pradėtų 1977 metų pabaigoje matavimų. Per šį laikotarpį buvo trys skirtingi dirbtinių radionuklidų patekimo į regioną šaltiniai: Kinijos branduoliniai bandymai atmosferoje, vienas po kito pastatyti du Ignalinos AE branduoliniai reaktoriai ir avarija Černobylio AE.

Ilgamečių ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų pažemio ore Ignalinos AE regione 1978-2008 metais vidutinės metinės reikšmės grafiškai atidedamos metų skalėje, ir jų kitimas atskirais laikotarpiais aproksimuojamas eksponentine lygtimi:

$$C_t = C_0 \exp\left[-\frac{\ln 2(t - t_0)}{T_{1/2}}\right], \quad (18)$$

čia C_t – vidutinė metinė radionuklido aktyvumo koncentracija ore ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) po t metų, C_0 – vidutinė metinė radionuklido aktyvumo koncentracija ore ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$) pradiniu momentu t_0 (metai) ir $T_{1/2}$ – radionuklido aktyvumo koncentracijos ore mažėjimo pusiau trukmė (metai^{-1}) (36 pav.). ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos pažemio

ore 2005-2008 metais parodytos kartu su neapibrėžtimis, kurios skaitine verte lygios labiausiai tikėtinų ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore standartiniams nuokrypiams.



36 pav. Metinių ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų pažemio ore Ignalinos AE regione eiga 1978-2008 metais (linija sujungti taškai) ir rezultatų aproksimacijos eksponentine lygtimi rezultatai (trys raudonos spalvos linijos). Nurodytos kiekvienam iš trijų skirtingų laikotarpių būdingos ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų pažemio ore mažėjimo pusiau trukmės $T_{1/2}$: 1 - 1981-1985 metai, 2 - 1986-1988 metai, 3 - 1988-2008 metai.

Kaip matyti iš 36 pav., išsiskiria trys laikotarpiai su kiekvienam jų būdinga ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų pažemio ore mažėjimo pusiau trukme.

1978-1985 metais ^{137}Cs patekimo į pažemio orą Ignalinos AE rajone šaltinis buvo kinų branduolinio ginklo bandymai atmosferoje (paskutinis bandymas įvykdytas 1980.10.16). Bandymų metu dalijimosi produktai pasiekė aukštesnius troposferos sluoksnius ir stratosferą. ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore padidėjimas 1981 metais iki $31 \mu\text{Bq/m}^3$ yra susijęs su ^{137}Cs globaliomis iškritomis iš radionuklido stratosferinio rezervuaro. Kaip žinoma, patekusio į stratosferą ^{137}Cs aktyvumo

koncentracijos ore mažėjimo pusiau trukmė yra apie 1-2 metus. Apskaičiuota 1981-1985 metais vidutinės metinės ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos pažemio ore mažėjimo pusiau trukmė $T_{1/2} \cong 9,7$ mėn.

1986-1988 metais ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore eigą lėmė radionuklidų patekimas į aukštesnius troposferos sluoksnius įvykus avarijai Černobylio AE – tai yra kitas geofiziniu ir radiologiniu požiūriu reikšmingas ^{137}Cs šaltinis pažemio ore. 1986 m. vidutinė ^{137}Cs aktyvumo koncentracija ore FI stotyje siekė $1230 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$, kuri sparčiai mažėjo laike dėl aerolio dalelių, radionuklido nešėjų, išplovimo iš troposferos su atmosferiniais krituliais ir kitų atmosferos savivalos procesų. 1986-1988 metais vidutinės metinės ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore mažėjimo pusiau trukmė $T_{1/2} \cong 1,7$ mėn.

Laikui bėgant po avarijos Černobylio AE, ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos pažemio ore Ignalinos AE regione turėtų mažėti ir toliau. Tačiau nuo 1988 m. iki šiol ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore mažėjo daug lėčiau ($T_{1/2} \cong 30$ metų), nei ankstesniais laikotarpiais (1981-1988 metais). ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore mažėjimo pusiau trukmė buvo beveik lygi radionuklido skilimo pusamžiui ($t_{1/2} = 30,08$ metų). Tai rodo, kad ^{137}Cs kiekis pažemio ore pastaraisiais metais beveik nesikeičia. Rezultatus galima paaiškinti, kad ^{137}Cs nuolat patenka iš radionuklido šaltinių aplinkoje atgal į atmosferą, tuo kompensuojamas radionuklido kiekio mažėjimas pažemio ore dėl išplovimo krituliais ir radioaktyvaus skilimo.

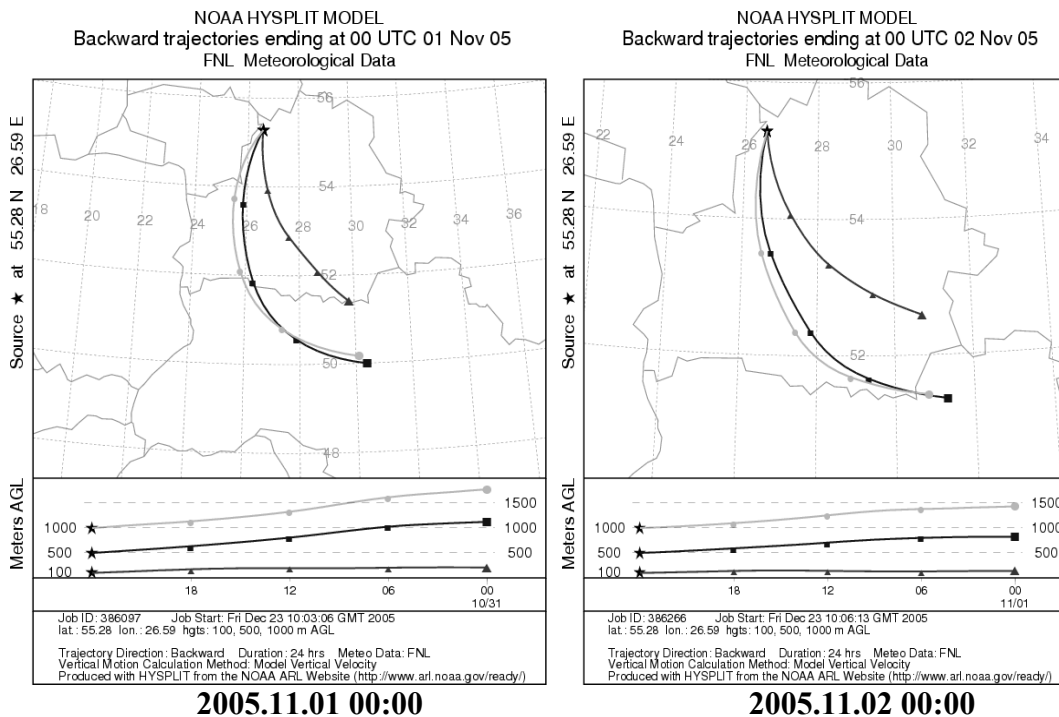
^{137}Cs antrinis pakėlimas nuo žemės paviršiaus į orą tikriausiai yra pagrindinis radionuklido šaltinis aplinkoje dabartyje. Tai įrodo šuoliški ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos ore padidėjimai laikotarpiais, kai bandinio ėmimo laikotarpiu FI stotį pasiekusių oro masių judėjimo trajektorijos kerta avarijos Černobylio AE labiausiai užterštus regionus.

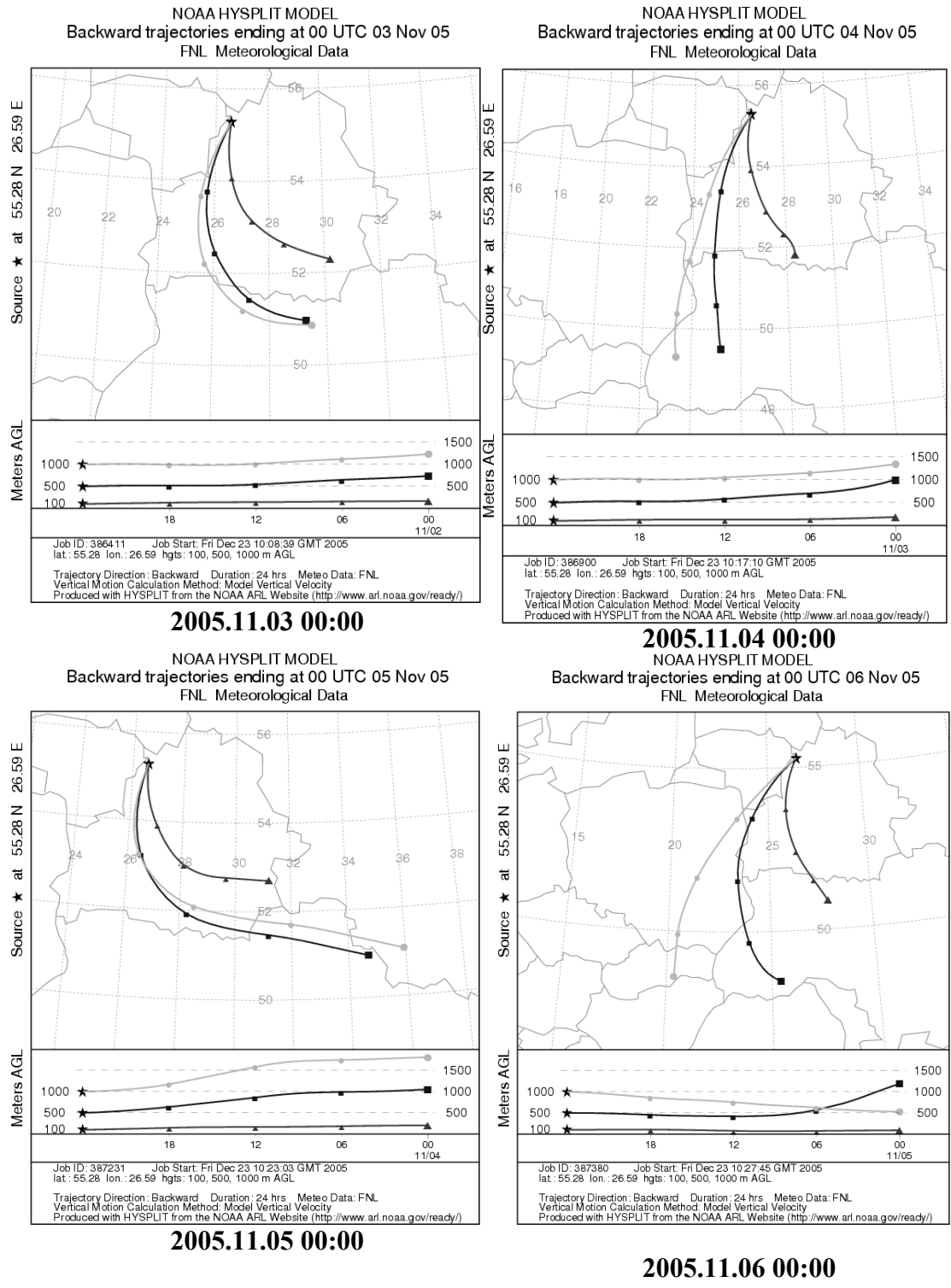
Nuo 1988 metų metinės ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos pažemio ore kinta su mažėjimo pusiau trukme, kuri beveik sutampa su ^{137}Cs skilimo pusamžiu.

4.3 ¹³⁷Cs aktyvumo koncentracijų ore padidėjimų analizė

Atskirais laikotarpiais FI stotyje buvo stebimi šuoliški ¹³⁷Cs aktyvumo koncentracijų ore padidėjimai. Padidintos ¹³⁷Cs koncentracijos pažemio ore per nagrinėjamą laikotarpį buvo registruotos atskirais atsitiktiniais laikotarpiais balandžio, rugsėjo-spalio ir gruodžio mėnesiais.

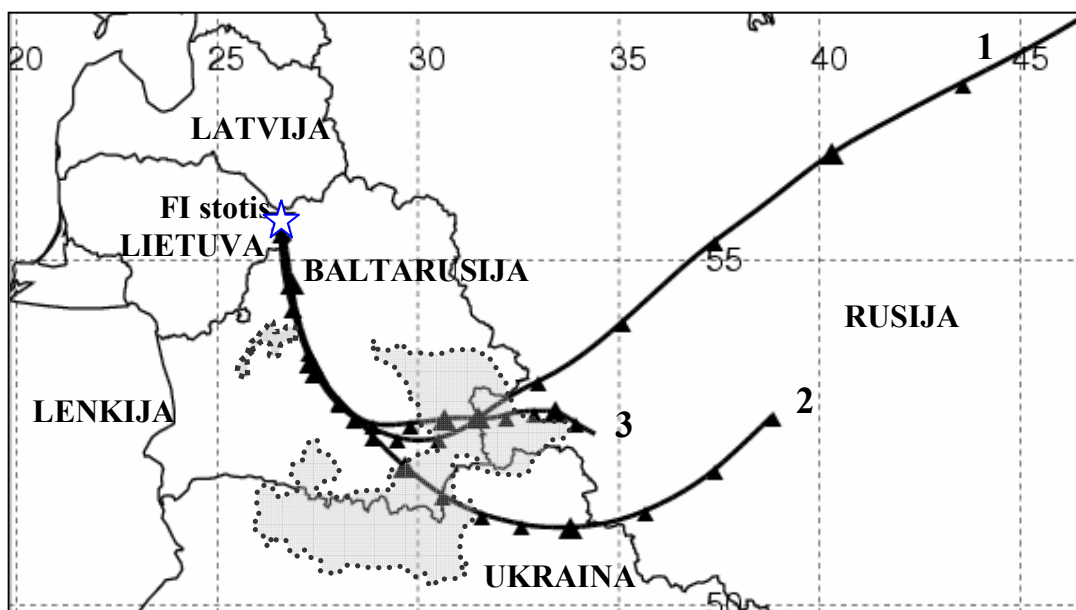
Didžiausia ¹³⁷Cs aktyvumo koncentracija ore per pastaruosius keturis metus buvo 2005.10.30-11.05 (17,4 μBq/m³). Šiam laikotarpiui, naudojant globalinį oro masių pernašos trajektorijų skaičiavimo ir priemaišų pasiskirstymo ore modelį HYSPLIT, atlikti atnešamų į Ignalinos AE regioną oro masių trajektorijų skaičiavimai. Buvo skaičiuotos atgalinės oro masių pernašos trajektorijos link FI stoties kas 6 valandas. 37 pav. pateikiame kas 24 valandas skaičiuotas paros trukmės atgalinių oro masių trajektorijas.





37 pav. Atgalinės oro masių judėjimo link FI stoties paros trukmės trajektorijos laikotarpiui 2005.10.30-11.06.

Papildomai atgalinės oro masių judėjimo trajektorijos į FI stotį bandinio ėmimo pradžioje, laikotarpio viduryje ir pabaigoje pavaizduotos žemėlapyje (38 pav.).



38 pav. Atgalinės oro masių judėjimo link FI stoties trajektorijos laikotarpiui 2005.10.30-11.05. 1 – atgalinė oro masių judėjimo trajektorija 10.30 12:00, 2 – 11.01 6:00 ir 3 – 11.05 12:00.

Atliekant atgalinių oro masių judėjimo trajektorijų skaičiavimus priėmėme, kad pažemio oras aukštyje iki 100 m yra pilnai išmaišytas. Kontūrine linija pažymėtos teritorijos, kuriose ^{137}Cs aktyvumo koncentracija dirvožemio paviršiuje viršija 40 kBq/m^2 .

Kaip matyti, pažemio oro aerozolio dalelių bandinio ėmimo laikotarpiu 2005.10.30-11.05 beveik visą laiką stebima oro masių, praėjusių pažeme virš avarijos Černobylio AE užterštų rajonų, pernaša link FI stoties.

Šuoliški ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore padidėjimai iki didesnių nei $9 \mu\text{Bq/m}^3$ aktyvumo koncentracijų ore per pastaruosius septynis metus buvo stebėti 8 kartus. Radionuklidų aktyvumo koncentracijų ore matavimo rezultatai šiais laikotarpiais pateikti 16 lentelėje.

16 lentelė. Radionuklidų aktyvumo koncentracijos pažemio ore laikotarpiais, kai buvo stebėti šuoliški ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore padidėjimai.

| Bandinio ėmimo laikotarpis | Radionuklido aktyvumo koncentracija ore, $\mu\text{Bq/m}^3$ | | | |
|----------------------------|---|-----------------|------------------|------------------|
| | ^{137}Cs | $^7\text{Be}^*$ | ^{60}Co | ^{54}Mn |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 2002.09.03 - 10 | $10,3 \pm 1,8$ | $2,7 \pm 0,3$ | $< 0,1$ | $< 0,1$ |
| 2003.04.26 - 30 | $10,2 \pm 1,6$ | $2,1 \pm 0,2$ | $< 0,1$ | $< 0,1$ |

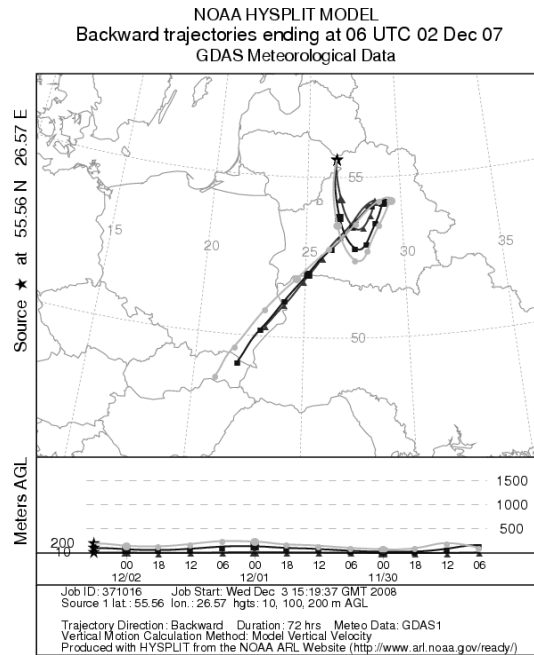
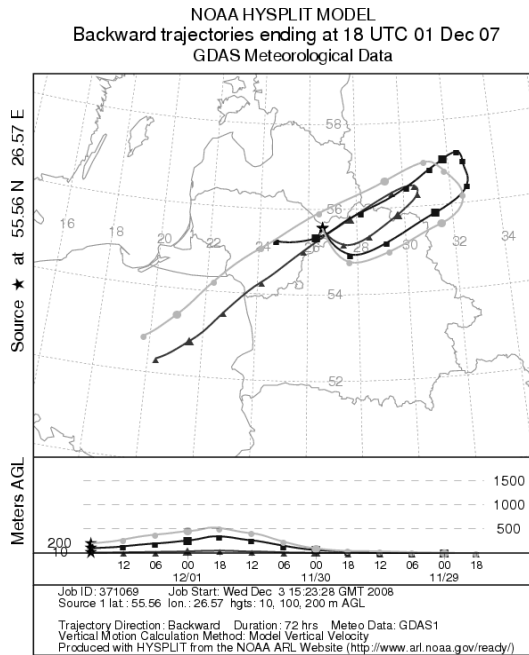
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------------|------------|------------|-----------|-----------|
| 2003.11.15 - 23 | 9,4 ± 1,7 | 2,9 ± 0,3 | < 0,1 | < 0,1 |
| 2004.01.06 - 16 | 14,9 ± 2,7 | 7,5 ± 0,6 | 2,8 ± 0,7 | < 0,1 |
| 2004.01.25 - 02.02 | 10,9 ± 1,6 | 3,1 ± 0,2 | < 0,1 | 1,0 ± 0,3 |
| 2005.10.30 - 11.05 | 17,4 ± 3,5 | 8,3 ± 0,7 | < 0,1 | < 0,1 |
| 2005.12.31 - 2006.01.07 | 8,9 ± 1,5 | 1,1 ± 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 2006.04.15 - 23 | 10,0 ± 1,8 | 13,5 ± 1,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| 2007.12.01 - 08 | 6,1 ± 0,9 | 2,4 ± 0,2 | < 0,1 | < 0,1 |

* mBq/m³

Lentelėje išskirtais laikotarpiais buvo skaičiuojamos 72 valandų (vidutinio sinoptinio periodo) trukmės atgalinės oro masių pernašos trajektorijos link FI stoties kas 6 valandas. Išsami ¹³⁷Cs aktyvumo koncentracijų ore padidėjimų Ignalinos AE regione 2005-2006 metais analizė pateikiama 1 priede. Pastaraisiais metais ¹³⁷Cs aktyvumo koncentracijų ore padidėjimai tampa mažiau ryškūs ir jų pasitaiko vis rečiau.

Lentelėje pateiktas unikalus ¹³⁷Cs aktyvumo koncentracijų ore padidėjimo iki 6 μBq/m³ 2007.12.01-08 atvejis įvertintas, kaip šuoliškas ¹³⁷Cs aktyvumo koncentracijų padidėjimas ir atlikti atgalinių oro masių pernašos į FI stotį trajektorijų skaičiavimai (39 pav.).

Unikalios meteorologines sąlygos buvo susiklosčiusios 2007.12.01 apie 15:00 UTC. Kaip matyti 39 pav., oro masės, prieš dvi paras praėjusios virš Ignalinos AE regiono, grįžo atgal. Šiuo laikotarpiu Ignalinos AE ventiliacinė sistema ir FI stoties pažemio oro aerolio dalelių bandinių ėmimo sistema galėjo siurbti pačios Ignalinos AE išmestus į pažemio orą radionuklidus. Tuo irgi gali būti paaiškintas ¹³⁷Cs aktyvumo padidėjimas šio laikotarpio bandinyje. Tokie efektai istoriškai buvo stebimi Bilibino AE Sibire [140]. Esant -60 °C oro temperatūrai žemesniuose oro sluoksniuose susidarydavo inversinės sąlygos, kad ventiliacinės sistemos sukurtas oro srautas buvo vienintelis oro judėjimo efektas ir išmesti radionuklidai grįždavo atgal, sukeldami rimtą pavojų AE personalui. Tokios oro masių trajektorijos Ignalinos AE regione stebimos pirmą kartą per visą stebėjimų laikotarpį nuo 1978 metų.



39 pav. Atgalinės oro masių judėjimo link FI stoties trajektorijos, pasiekusios matavimo stotį 2007 m. gruodžio 1, 2 d.

16 lentelėje pateiktų atvejų analizė (1 priedas) patvirtina faktą, kad beveik visais atvejais šuoliški ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų pažemio ore Ignalinos AE regione padidėjimai stebimi, kai FI stotį pasiekiančių oro masių trajektorijos kerta užterštas ^{137}Cs teritorijas Ukrainoje, Baltarusijoje ir Rusijoje.

Vertinant šuoliškų ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore padidėjimų sutapimus su oro pernaša iš Černobylio AE rajonų, galima teigti, kad nustatytas realus nuolat pasikartojantis ^{137}Cs patekimo į mūsų šalies teritoriją erdvinis šaltinis – teritorijos, užterštos ^{137}Cs po avarijos Černobylio AE.

4.4 Radionuklidų aktyvumo koncentracijos iškritose

Išplovimas krituliais yra efektyvus radionuklidų pašalinimo iš pažemio oro procesas. Ignalinos AE išmestų radionuklidų išplovimą krituliais artimoje zonoje iki 30 km galima įvertinti teoriškai skaičiuojant AE fakelo ir kritulių zonų sąveiką skirtingomis meteorologinėmis sąlygomis, kai radionuklidų išmetimo per AE kaminus greičiai ir radionuklidų išplovimo krituliais koeficientai yra žinomi. Pastarasis įvertinimas taip imlus kvalifikuotam darbu, kad dažniausiai neatliekamas.

Todėl tikslinga atlikti eksperimentinius Ignalinos AE pagamintų radionuklidų ir tuo pačiu kitų radionuklidų kiekio iškritose matavimus.

Iškritų bandinių paėmimo, apdorojimo ir radionuklidų aktyvumo matavimo bandiniuose metodika pateikiama Metodikos skyriuje (53 spl.). Beveik visuose iškritų bandiniuose buvo registruojamas ^{137}Cs , ^{60}Co ir ^7Be gama spinduliavimas. Radionuklidų srautai iš oro į dirvožemio paviršių, F , Bq/(m² mėnuo), stambiadispersinei ir smulkiadispersinei iškritų bandinio frakcijoms pateikiami 17 lentelėje.

17 lentelė. Radionuklidų srautai iš oro į dirvožemio paviršių Ignalinos AE regione 2005-2008 m.

| Bandinio ėmimo laikas | Radionuklidų srautai iš oro į dirvožemio paviršių, F , Bq/(m ² mėnuo) | | | | | |
|-----------------------|--|------------------|---------------|---|-------------------|-----------------|
| | smulkiadispersinė iškritų bandinio frakcija | | | stambiadispersinė iškritų bandinio frakcija | | |
| | ^{137}Cs | ^{60}Co | ^7Be | ^{137}Cs | ^{60}Co | ^7Be |
| 2005.01.23-03.17 | 0,5 | 0,11 | 28 | 0,021 | 0,006 | 0,25 |
| 2005.04.20-05.29 | 1,5 | < 0,03 | 22 | 0,012 | < 0,002 | 0,14 |
| 2005.05.29-07.12 | 1,5 | 0,12 | 26 | 0,011 | < 0,002 | < 0,05 |
| 2005.07.12-09.26 | 1,7 | 0,10 | 19 | 0,005 | 0,03 | < 0,05 |
| 2005.09.26-11.05 | 0,8 | < 0,03 | 1,8 | 0,011 | < 0,002 | < 0,05 |
| 2006.01.31-03.12 | 0,9 | 0,06 | 41 | 0,020 | 0,011 | < 0,05 |
| 2006.03.12-07.20 | 1,2 | 0,06 | 17 | 0,012 | 0,005 | < 0,05 |
| 2006.07.20-25 | 2,2 | < 0,03 | 21 | 0,109 | 0,042 | < 0,05 |
| 2006.07.25-08.07 | 1,8 | < 0,03 | 16 | 0,072 | 0,016 | < 0,05 |
| 2006.08.07-09.27 | 1,6 | 0,10 | 11 | 0,009 | < 0,002 | < 0,05 |
| 2006.09.27-11.03 | 0,5 | 0,05 | 9 | 0,022 | < 0,002 | < 0,05 |
| 2007.01.20-03.01 | 0,9 | 0,08 | 21 | 0,023 | 0,012 | 0,34 |
| 2007.03.01-06.06 | 0,9 | 0,05 | 19 | 0,015 | < 0,002 | 0,11 |
| 2007.06.06-07.10 | 1,0 | < 0,03 | 23 | 0,009 | < 0,002 | < 0,05 |
| 2007.07.10-10.06 | 0,7 | < 0,03 | 10 | 0,008 | < 0,002 | < 0,05 |
| 2007.10.06-11.17 | 1,1 | 0,07 | 8 | 0,017 | < 0,002 | < 0,05 |
| 2008.01.31-03.06 | 0,8 | < 0,03 | 25 | 0,018 | < 0,002 | 0,18 |
| 2008.03.06-04.23 | 1,8 | < 0,03 | 23 | 0,020 | < 0,002 | < 0,05 |
| Vidutinė vertė: | $1,1 \pm 0,3$ | $0,05 \pm 0,02$ | 18 ± 3 | $0,015 \pm 0,005$ | $0,005 \pm 0,002$ | $0,05 \pm 0,01$ |

Radionuklidų srautų iš oro į dirvožemio paviršių vidutinės vertės apskaičiuotos kaip svertinis radionuklidų srautų iš oro į dirvožemio paviršių skirtingais bandinių ėmimo laikotarpiais vidurkis.

Kaip matyti, atskiruose iškritų bandiniuose registruojamas ^{60}Co gama spinduliavimas. Iškritų bandinių paėmimo vietoje per ilgą bandinių ėmimo laikotarpį buvo surenkama keletas oro ėminių, kuriuose išmatuoti ^{60}Co ir ^{54}Mn aktyvumai.

Radionuklidų aktyvumai smulkiadispersinėje iškritų bandinių frakcijose buvo 10-100 kartų didesni nei stambiadispersinėje iškritų bandinių frakcijose.

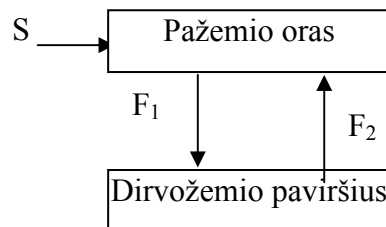
^7Be srautų iš oro į dirvožemio paviršių reikšmės gautos remiantis statistiškai patikimai išmatuotais dydžiais ir gali būti panaudotos kosmogeninių radionuklidų balanso troposferoje vertinimams. 18 lentelėje pateikti ^7Be srautai iš oro į dirvožemio paviršių, F , $\text{Bq}/(\text{m}^2 \text{ mėnuo})$, 2005-2008 metais ir ankstesniais 1980-1983 [14], 1997-1999 [16] metais.

18 lentelė. ^7Be srautai iš oro į dirvožemio paviršių 1980-1983, 1997-1999, 2005-2008 metais.

| Metai | F , $\text{Bq}/(\text{m}^2 \text{ metai})$ | Metai | F , $\text{Bq}/(\text{m}^2 \text{ metai})$ | Metai | F , $\text{Bq}/(\text{m}^2 \text{ metai})$ |
|-------|--|-------|--|-------|--|
| 1980 | 41 | 1997 | 68 | 2005 | 97 |
| 1981 | 50 | 1998 | 67 | 2006 | 114 |
| 1982 | 46 | 1999 | 53 | 2007 | 82 |
| 1983 | 35 | | | 2008 | 48 |

^7Be srautų iš oro į dirvožemio paviršių Ignalinos AE regione kaita per pastaruosius 30 metų gali būti sąlygota antropogeninio poveikio klimatui.

^{137}Cs srautų iš oro į dirvožemio paviršių reikšmės atspindi ^{137}Cs dinamiką sistemoje „Pažemio oras–dirvožemio paviršius“. Laikydami iki 100 m aukščio išmaišytą oro sluoksnį virš teritorijos, apribotos atstumu, kurį oro masės praeina trijų parų sinoptinio laikotarpio eigoje, sąlyginu „Pažemio oru“ ir teritoriją, kurioje pernešamos oro masės, sąlyginu „Dirvožemio paviršiumi“, rodyklėmis parodome trijų pagrindinių ^{137}Cs srautų kryptis (40 pav.).



40 pav. S – radionuklido srautas, patenkantis į pažemio orą iš visų veikiančių atominių elektrinių ir kitų šaltinių, F_1 – radionuklido srautas iš pažemio oro į dirvožemio paviršių. F_2 – radionuklido srautas iš dirvožemio paviršiaus į orą.

Nagrinėjamoje teritorijoje atsiduria trys atominės elektrinės – Ignalinos AE, Černobylio AE ir Leningrado AE, augalijoje ir dugno nuosėdose susikaupęs

„bombinis“ ir „Černobylinis“ ^{137}Cs ; šioje teritorijoje vyksta medienos, sausos žolės ir durpių deginimas ir yra kiti ^{137}Cs šaltiniai.

Ekspimentiniai ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos iškritose rezultatai ir, kaip buvo parodyta 4.2 skyriuje, nustatytas faktas, kad nuo 1988 metų metinės ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos pažemio ore kinta su mažėjimo pusiau trukme, kuri beveik sutampa su ^{137}Cs skilimo pusamžiu, leidžia padaryti išvadą, kad ^{137}Cs srautų S ir F_2 suma lygi ^{137}Cs srautui F_1 . Pagal radionuklidų aktyvumo matavimus iškritose (17 lentelė) gauta vidutinė ^{137}Cs srauto iš oro į dirvožemio paviršių 2005-2008 reikšmė $\cong 1,1 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \text{ mėnuo})$ atspindi ^{137}Cs srautą į pažemio orą iš visų radionuklido emisijos šaltinių Ignalinos AE regione.

2005-2008 metais vidutinė metinė ^{137}Cs aktyvumo koncentracija ore buvo apie $1,5 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (žr. 14 lentelę), o vidutinis metinis ^{137}Cs srautas iš oro į žemės paviršių buvo apie $13 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \text{ metai})$. Šie rezultatai sudaro galimybę įvertinti ^{137}Cs , išlėkusio iš Ignalinos AE, srauto į „Pažemio orą“ dalį. Naudojant vidutinę metinę ^{137}Cs emisiją iš Ignalinos AE ventiliacinių kaminų į aplinką apie 100 MBq (žr. 7 lentelę), suskaičiuota, kad Ignalinos AE pagaminto ^{137}Cs vidutinė metinė aktyvumo koncentracija ore būtų apie $0,1 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$, o iškritose apie $1,5 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \text{ metai})$. Galima teigti, kad apie 10 % ^{137}Cs kiekio esančio ore ir iškrentančio į dirvožemio paviršių yra iš Ignalinos AE.

Apibendrinant aukščiau skyriuje pateiktą informaciją, galima teigti, kad aplinkoje į pažemio orą ^{137}Cs nuolat patenka iš veikiančių atominių elektrinių ir su antriniu priemaišų pakėlimu užterštose teritorijose, o jo patekimas kompensuojamas išplovimu krituliais ir radioaktyviuoju skilimu. Tikriausiai, ^{137}Cs dar ilgą laiką išliks vienu svarbiausių dirbtinių radionuklidų pažemio ore.

4.5 Trumpaamžių radionuklidų aktyvumo koncentracijos Ignalinos AE ventiliacinėje sistemoje

Ignalinos AE garo kondensacijos ir ventiliacinės sistemos ore (žr. Literatūros apžvalga, 29 psl.) susidaro radioaktyvių aerosolio dalelių ir oro mišinys, išlekiantis per kaminus į pažemio orą. 2008.04.22-24 tikslu nustatyti surinktų ant filtrų inertinių dujų radionuklidų skilimo produktų aktyvumo koncentracijas tarpiniuose taškuose radionuklidų kelyje nuo pasigaminimo vietos iki pažemio oro, išmatuotos (bandinių

ėmimas prapučiant oro ir aerosolinių dalelių mišinį per aerosolio dalelių filtrus) radionuklidų aktyvumo koncentracijos ventiliacinio oro sraute po garo turbinos ir deaeratoriaus.

Radionuklidų, surinktų ant aerosolio dalelių filtrų, aktyvumo koncentracijos Ignalinos AE veikiančio 2 bloko reaktoriaus ventiliacinės sistemos atskirų įrenginių ore pateiktos 19 lentelėje.

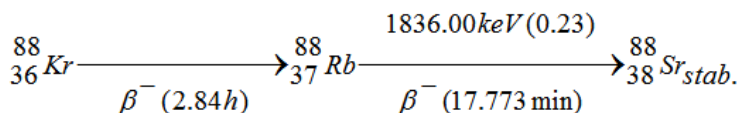
19 lentelė. Radionuklidų, surinktų ant aerosolio dalelių filtrų, aktyvumo koncentracijos Ignalinos AE veikiančio reaktoriaus ventiliacinės sistemos komponentėse, C (Bq/m³).

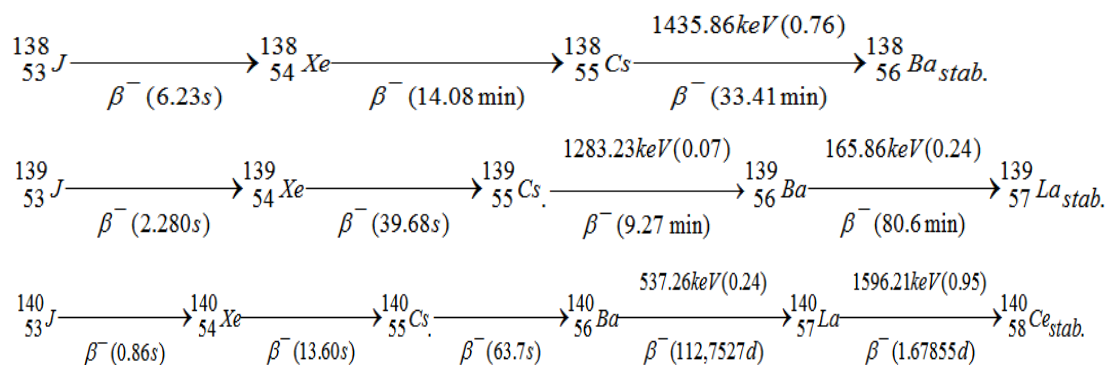
| Radionuklidas | Išlaikymo kamera | | Aktyvumo mažinimo įrenginys | |
|-------------------|----------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|
| | Iki kameros | Po kameros | Iki įrenginio | Po įrenginio |
| ⁸⁸ Rb | 4.5×10^{10} | 3.2×10^8 | 3.6×10^7 | – |
| ⁹¹ Sr | 7.4×10^7 | 1.1×10^7 | – | 7.8×10^5 |
| ¹³¹ I | 4.7×10^6 | 4.9×10^5 | 1.1×10^6 | 4.2×10^2 |
| ¹³⁷ Cs | 1.3×10^7 | 2.6×10^6 | 3.4×10^3 | 6.3×10^2 |
| ¹³⁸ Cs | 2.5×10^{10} | 2.3×10^9 | 3.4×10^6 | 1.7×10^6 |
| ¹³⁹ Ba | 1.6×10^{10} | 5.8×10^8 | 2.0×10^6 | 1.5×10^6 |
| ¹⁴⁰ Ba | 3.4×10^7 | 7.6×10^6 | 2.1×10^4 | – |

„–„ – radionuklido aktyvumas bandinyje žemiau registravimo ribos

Galima manyti svarbiausias rezultatas yra ⁸⁸Rb, ¹³⁸Cs, ¹³⁹Ba ir ¹⁴⁰Ba, rastų aerosolio dalelių filtrų bandiniuose, aktyvumo koncentracijos ežektorinėse dujose prieš išlaikymo kamerą, kurios yra $3,4 \times 10^7 - 4,5 \times 10^{10}$ Bq/m³ dydžių intervale. Šie trumpaamžiai radionuklidai turi pirmtakus – inertinių dujų radionuklidus (⁸⁸Kr, ¹³⁸Xe, ¹³⁹Xe, ¹⁴⁰Xe). Rezultatai rodo, kad inertinių dujų radionuklidai, įveikę vandens ir garo ribą būgne-separatoriuje, aušinamuose vandens garuose po turbinos virsta šarminių ir žemės šarminių metalų elementais: ⁸⁸Rb $T_{1/2}=17,8$ min., ¹³⁸Cs $T_{1/2}=33,4$ min. ir ¹³⁹Ba $T_{1/2}=80,6$ min. Jie tampa aerosolio gamybos centrais, absorbuoja vandens molekules ir mažiau nei per keliolika minučių ant jų, kaip kondensacijos branduolių, išauga aerosolio dalelės, kurios surenkamos ant aerosolinių filtrų.

Išdėstyta iliustruoja užregistruotų trumpaamžių ⁸⁸Rb, ¹³⁸Cs, ¹³⁹Ba ir ¹⁴⁰Ba susidarymo ir skilimo grandinėls:





Vardiklyje nurodytas radionuklido skilimo pusamžis, skaitiklyje – radionuklido spinduliuojamo gama kvanto energija, pagal kurią buvo vertinamas radionuklido aktyvumas, ir gama kvanto išspinduliavimo tikimybė radionuklido skilimo metu. „*Stab.*“ grandinėlės pabaiga – stabilus izotopas.

Stebėtas procesas, kai aušinamuose vandens garuose po turbinos inertinių dujų radionuklidai virsta šarminių ir žemės šarminių metalų elementais bei tampa aerozolio dalelių gamybos centrais yra analogiškas klasikiniam procesui atmosferoje, kai emanacijų (^{222}Rn , ^{220}Tn , ^{219}An) skilimo produktai labai greitai atsiduria aerozolio dalelių sudėtyje [2, 141].

Toks dujų ir aerozolio dalelių mišinys po užlaikymo ir filtravimo ventiliacinės sistemos įrenginiuose išmetamas per AE kaminus.

SKYRIAUS IŠVADOS

1. Metinių ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore kaita regione 1988-2008 m. aprašyta eksponentine funkcija su mažėjimo pusiau trukme $T_{1/2} \cong 30$ metų.
2. Vidutinė ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos iškritose Ignalinos AE aplinkoje 2005-2008 m. reikšmė gauta lygi $1,1 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \text{ mėnuo})$.
3. Šuoliški ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų pažemio ore padidėjimai koreliuoja su oro masių pernašos trajektorijomis, kertančiomis teritorijas, užterštas po avarijos Černobylio AE iki šiol liekančias ^{137}Cs patekimo į orą šaltiniu.
4. Vieno kontūro atominės elektrinės aušinamame vandens gare inertinių dujų radionuklidai, skildami virsta šarminių ir žemės šarminių metalų elementais, tampa aerozolio gamybos centrais, absorbuoja vandens molekules ir per keliolika minučių ant jų, kaip kondensacijos branduolių, išauga radioaktyvios aerozolio dalelės.

5. Surinktų filtrais aerolio dalelių išplovimas

Surinktų filtrais aerolio dalelių bandiniai išplovimo vandeniū eksperimentams buvo paimti skirtingose sistemos „Ignalinos AE – aplinka“ vietose: 1) pažemio ore FI stotyje Ignalinos AE regione 2004-2005 metais, kai ore buvo registruojami AE pagaminti radionuklidai, 2) Ignalinos AE veikiančio ir sustabdyto reaktorių kaminų ore (išlėkose į orą) 2006-2007 metais ir papildomai veikiančio Ignalinos AE reaktoriaus ežektorinių dujų sraute į ventiliacinės sistemos įrenginius 2008 metais.

5.1 Pažemio ore surinktų filtrais aerolio dalelių išplovimas

Pažemio ore surinktų filtrais aerolio dalelių išplovimo eksperimentams atrinkome šešis pažemio oro aerolio dalelių bandinius, paimtus FI stotyje 2004-2005 metais laikotarpiais, kai FI stotis buvo pavėjinėje Ignalinos AE pusėje (žr. 14 lentelę, bandiniai Nr. 2906, 2922, 2947, 2948, 2956, 2985; prasiurbto oro tūris 200 000-300 000 m³). Šiuose bandiniuose visada buvo registruojamas ⁶⁰Co gama spinduliavimas. ¹³⁷Cs aktyvumo koncentracijos ore bandinių ėmimo laikotarpiais buvo 0,9 - 2,4 μBq/m³, išskyrus 2005.01.29-02.05 paimtą bandinį, kai ¹³⁷Cs aktyvumo koncentracijos ore buvo 4,5 μBq/m³.

Dar keturi pažemio oro aerolio dalelių bandiniai buvo paimti laikotarpiais, kai pažemio ore buvo išmatuotos padidintos ¹³⁷Cs aktyvumo koncentracijos ore, atitinkamai 5,5, 4,4, 6,2 ir 17,2 μBq/m³ (bandiniai Nr. 2973, 2974, 2977, 2978). Paskutinio 2005.11.26-12.04 bandinio ėmimo metu ¹³⁷Cs aktyvumo koncentracija ore buvo 2,5 μBq/m³ (bandinys Nr. 2982). Visuose šiuose bandiniuose ⁶⁰Co gama spinduliavimas nebuvo registruojamas.

¹³⁷Cs ir ⁶⁰Co aktyvumai pažemio oro aerolio dalelių bandiniuose iki išplovimo eksperimento, A (mBq), ir po eksperimento, A_{nt} (mBq), bei išplautoje aerolio dalelių bandinio frakcijoje radionuklidų aktyvumų santykiai su radionuklidų aktyvumais pradiniame bandinyje, W (%), pateikiami 20 lentelėje.

20 lentelė. ^{137}Cs ir ^{60}Co aktyvumai pažemio oro aerozolio dalelių bandiniuose iki išplovimo eksperimento ir po išplovimo eksperimento bei išplautoje aerozolio dalelių bandinio frakcijoje radionuklidų aktyvumų santykiai su radionuklidų aktyvumais pradiniame bandinyje.

| Eil. Nr | Aerozolio bandinio ėmimo laikotarpis | ^{137}Cs | | | ^{60}Co | | |
|-----------------------|--------------------------------------|-------------------|----------|-------------|------------------|----------|------------------------------|
| | | Aktyvumas, mBq | | $W, \%$ | Aktyvumas, mBq | | $W, \%$ |
| | | A | A_{nt} | | A | A_{nt} | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 2906 | 2004.03.20-30 | 440 | 270 | 39 ± 10 | 165 | 130 | 21 ± 7 |
| 2922 | 2004.07.26-08.03 | 305 | 210 | 31 ± 8 | 300 | 230 | 23 ± 6 |
| 2947 | 2005.01.02-08 | 170 | 120 | 29 ± 7 | 270 | 210 | 22 ± 7 |
| 2948 | 2005.01.29-02.05 | 1250 | 390 | 69 ± 15 | 105 | 80 | 24 ± 6 |
| 2956 | 2005.04.21-05.01 | 495 | 420 | 15 ± 3 | 760 | 570 | 25 ± 6 |
| 2985 | 2005.12.27-31 | 420 | 370 | 12 ± 3 | 190 | 140 | 26 ± 7 |
| Vidutinė vertė | | | | – | | | 24 ± 7 |
| 2973 | 2005.09.26-10.02 | 1640 | 1170 | 29 ± 6 | – | – | – |
| 2974 | 2005.10.02-09 | 1230 | 810 | 34 ± 7 | – | – | – |
| 2977 | 2005.10.22-30 | 860 | 490 | 43 ± 7 | – | – | – |
| 2978 | 2005.10.30-11.05 | 4280 | 2215 | 48 ± 7 | – | – | – |
| 2982 | 2005.11.26-12.04 | 185 | 130 | 30 ± 5 | – | – | – |

„–„ – radionuklido aktyvumas bandinyje žemiau registravimo ribos

Pažemio oro bandiniuose, paimtuose laikotarpiams, kai FI stotis buvo pavėjinėje Ignalinos AE pusėje, išplautų iš aerozolio dalelių bandinių ^{137}Cs aktyvumų santykiai su radionuklido aktyvumais pradiniuose bandiniuose kito plačiame intervale nuo 12 % iki 39 %, išskyrus vieną atvejį 2005.01.29-02.05, kai tuo laikotarpiu buvo stebima oro masių pernaša iš avarijos Černobylio AE užterštą teritoriją. Toks išplautoje aerozolio dalelių bandinių frakcijoje ^{137}Cs aktyvumų santykių su radionuklido aktyvumais pradiniuose bandiniuose verčių išsibarstymas paaiškinamas skirtingais ^{137}Cs šaltiniais pažemio ore bandinių ėmimo laikotarpiams. Pažemio oro bandiniuose, paimtais laikotarpiams, kai FI stotis nebuvo Ignalinos AE pavėjinėje pusėje, išplautoje aerozolio dalelių bandinių frakcijoje ^{137}Cs aktyvumų santykiai su radionuklido aktyvumais pradiniuose bandiniuose buvo nustatyti siauresniame intervale nuo 29 % iki 48 %. Pastebėta, kad bandiniuose, paimtuose ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore šuoliškų padidėjimų laikotarpiams (bandiniai Nr. 2948, 2977, 2978), išplautoje aerozolio dalelių bandinių frakcijoje ^{137}Cs aktyvumų santykiai su radionuklido aktyvumais pradiniuose bandiniuose buvo didesni, negu bandiniuose,

surinktuose kitais laikotarpiais. Trijuose bandiniuose, paimtuose 2005.02.29-02.05, 2005.10.22-30 ir 2005.10.30-11.05, kai į FI stotį galėjo patekti oro masės, praeinančios virš po avarijos Černobylio AE užterštą teritoriją, išplautoje aerolio dalelių bandinių frakcijoje ^{137}Cs aktyvumų santykiai su radionuklido aktyvumais pradiniuose bandiniuose buvo 69, 43 ir 48 %.

Išplautoje aerolio dalelių bandinių frakcijoje ^{60}Co aktyvumų santykiai su radionuklido aktyvumais pradiniuose bandiniuose buvo intervale nuo 21 % iki 27 %, o vidutinis išplautoje aerolio dalelių bandinių frakcijoje ^{60}Co aktyvumo santykis su radionuklido aktyvumu pradiniame bandinyje buvo 24 ± 7 %. Akivaizdu, kad ^{60}Co šaltinis yra išlėkos iš Ignalinos AE, ir gauti išplautoje aerolio dalelių bandinių frakcijoje ^{60}Co aktyvumų santykiai su radionuklido aktyvumais pradiniuose bandiniuose atspindi aerolio dalelių savybių kitimą 3,5 km kelyje nuo AE kamino iki bandinių ėmimo taško.

Vidutiniai išplautoje aerolio dalelių bandinių frakcijoje ^{137}Cs ir ^{60}Co aktyvumų santykiai su radionuklidų aktyvumais pradiniuose bandiniuose buvo 25 % ir 24 %, atitinkamai. Šios vertės artimos vidutiniam kontinentinės oro masės aerolio dalelių masės kiekiui tirpioje frakcijoje – 28 % (žr. 37 psl.). ^{137}Cs ir ^{60}Co dalis pažemio ore surinktų aerolio dalelių vandenyje tirpioje frakcijoje buvo 32 % ir 22 %, atitinkamai (žr. 38 psl.).

Aerolio dalelių bandiniuose, paimtuose kai į FI stotį galėjo patekti oro masės, praeinančios virš po avarijos Černobylio AE užterštą teritoriją, išplautoje iš aerolio dalelių bandinių frakcijoje ^{137}Cs aktyvumų santykiai su radionuklido aktyvumais pradiniuose bandiniuose buvo didesni, negu bandiniuose, surinktuose kitais laikotarpiais. Pažemio oro aerolio dalelių bandiniuose, surinktuose po miškų gaisrų avarijos Černobylio AE užterštose teritorijose, ^{137}Cs dalis aerolio dalelių vandenyje tirpioje frakcijoje siekė 60 % (žr. 29 psl.).

Gauti išplautoje aerolio dalelių bandinių, surinktų filtrais, frakcijoje radionuklidų aktyvumų santykiai su radionuklidų aktyvumais pradiniuose bandiniuose gerai koreliuoja su literatūroje pateiktais radionuklidų pasiskirstymo tarp tirpios ir netirpios frakcijų rezultatais.

5.2 IAE ventiliaciniame ore surinktų filtrais aerozolio dalelių išplovimas

Ignalinos AE ventiliaciniame ore surinktų filtrais aerozolio dalelių išplovimo eksperimentams buvo paimti 7 aerozolio dalelių bandiniai Ignalinos AE veikiančio 2 bloko reaktoriaus ventiliaciniame kamine ir 8 aerozolio dalelių bandiniai neveikiančio 1 bloko reaktoriaus ventiliaciniame kamine 2006-2007 metais. Ignalinos AE 2 ir 1 blokų reaktorių ventiliacinio oro aerozolio dalelių bandiniai buvo paimti lygiagrečiai, beveik tais pačiais laikotarpiais.

^{137}Cs ir ^{60}Co aktyvumai Ignalinos AE ventiliacinio oro aerozolio dalelių bandiniuose iki išplovimo eksperimento, A (mBq), ir po eksperimento, A_{nt} (mBq), bei išplautoje aerozolio dalelių bandinio frakcijoje radionuklidų aktyvumų santykiai su radionuklidų aktyvumais pradiniam bandinyje, W (%), pateikiami 21 lentelėje.

21 lentelė. ^{137}Cs ir ^{60}Co aktyvumai Ignalinos AE ventiliacinio oro aerozolio dalelių bandiniuose iki išplovimo eksperimento ir po išplovimo eksperimento bei išplautoje aerozolio dalelių bandinio frakcijoje radionuklidų aktyvumų santykiai su radionuklidų aktyvumais pradiniam bandinyje.

| Bandinio ėmimo laikas | ^{137}Cs | | | ^{134}Cs | | | ^{54}Mn | | | ^{60}Co | | | |
|---|---------------------|----------|---------|---------------------|----------|---------|---------------------|----------|---------|---------------------|----------|---------|----------------|
| | Aktyvu- mas, mBq | | $W, \%$ | Aktyvu- mas, mBq | | $W, \%$ | Aktyvu- mas, mBq | | $W, \%$ | Aktyvu- mas, mBq | | $W, \%$ | |
| | A | A_{nt} | | A | A_{nt} | | A | A_{nt} | | A | A_{nt} | | |
| 2 bloko reaktorius, veikiantis | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 2006.01. 10-19 | | 190 | 65 | 66±6 | – | – | – | 130 | 45 | 65±15 | 420 | 120 | 71±17 |
| 2007.06 01-07 | | 1760 | 210 | 88±7 | 85 | 25 | 71±25 | 90 | 40 | 56±20 | 195 | 70 | 64±14 |
| 2007.06. 07-15 | | 2040 | 505 | 75±6 | 125 | 40 | 68±20 | 165 | 50 | 70±15 | 270 | 80 | 70±16 |
| 2007.06. 19-26 | | 1580 | 265 | 83±10 | 105 | 45 | 57±15 | 170 | 35 | 79±20 | 605 | 190 | 69±16 |
| 2007.06. 26-07.03 | | 350 | 120 | 66±6 | 60 | – | – | 1030 | 300 | 71±17 | 2420 | 830 | 66±15 |
| 2007.07. 10-16 | | 665 | 180 | 73±8 | 70 | 70 | 0 | 225 | 60 | 73±20 | 470 | 150 | 68±17 |
| 2007.07. 17-24 | | 165 | 50 | 70±7 | – | – | – | 225 | – | – | 310 | 120 | 61±14 |
| Vidutinė vertė | | | | 74 ± 22 | | | – | | | 69 ± 25 | | | 67 ± 17 |
| 1 bloko reaktorius, neveikiantis | | | | | | | | | | | | | |
| 2005.12.23- 2006.01.03 | | 215 | 160 | 26±3 | – | – | – | – | – | – | 185 | 145 | 22±3 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|---------------------------|-----|-----|---------------|-----|-----|-------|----|---|----|-----|-----|---------------|
| 2006.01. 3-9 | 235 | 170 | 28±3 | – | – | – | – | – | – | 210 | 160 | 24±4 |
| 2006.01. 23-29 | 60 | 50 | 17±2 | – | – | – | 30 | – | – | 150 | 130 | 13±2 |
| 2007.06. 01-07 | 40 | 35 | 12±2 | – | – | – | – | – | – | 155 | 110 | 29±5 |
| 2007.06. 07-15 | 120 | 100 | 17±2 | – | – | – | 40 | – | – | 250 | 220 | 12±3 |
| 2007.06. 19-26 | 295 | 230 | 22±3 | – | – | – | – | – | – | 250 | 200 | 20±4 |
| 2007.06. 26-07.03 | 780 | 485 | 38±5 | 605 | 360 | 40±10 | 35 | – | – | 345 | 290 | 16±3 |
| 2007.07. 10-16 | 60 | 40 | 33±4 | 40 | – | – | – | – | – | 240 | 190 | 21±4 |
| Vidutinė vertė | | | 24 ± 5 | | | | – | | – | | | 20 ± 5 |

„–„ – radionuklido aktyvumas bandinyje žemiau registravimo ribos

Visuose ventiliacinio oro aerozolio dalelių bandiniuose buvo registruojamas ^{137}Cs ir ^{60}Co gama spinduliavimas. ^{134}Cs , ^{54}Mn gama spinduliavimas buvo registruojamas tik tai bandiniuose, paimtuose Ignalinos AE veikiančio 2 bloko reaktoriaus ventiliaciniame kamine. Ignalinos AE neveikiančio reaktoriaus ventiliaciniame kamine paimtuose bandiniuose sąlyginai trumpaamžių ^{134}Cs , ^{54}Mn gama spinduliavimas nebuvo registruojamas. Vidutinis išplautoje aerozolio dalelių bandinio frakcijoje radionuklidų aktyvumų santykis su radionuklidų aktyvumais pradiniame bandinyje buvo skaičiuotas kaip vidutinė kiekvienam registruojamam radionuklidui veikiančio ir neveikiančio reaktoriaus ore aritmetinė W vertė.

^{137}Cs aktyvumų bandiniuose prieš ir po išplovimą santykiečiai veikiančiame ir neveikiančiame reaktoriuje skyrėsi reikšmingai: $74 \pm 22 \%$ ir $24 \pm 5 \%$, atitinkamai.

Išplautoje aerozolio dalelių bandinių, surinktų Ignalinos AE veikiančio ir neveikiančio reaktoriaus ventiliaciniame ore, frakcijoje ^{60}Co aktyvumų santykiečiai su radionuklido aktyvumais pradiniuose bandiniuose buvo $67 \pm 17 \%$ ir $20 \pm 5 \%$, atitinkamai.

Išplautoje aerozolio dalelių bandinių, surinktų Ignalinos AE veikiančio reaktoriaus ventiliaciniame ore, frakcijoje ^{54}Mn aktyvumų santykiečiai su radionuklido aktyvumais pradiniuose bandiniuose buvo $69 \pm 25 \%$. ^{54}Mn aktyvumai bandiniuose, paimtuose Ignalinos AE neveikiančio reaktoriaus ventiliaciniame kamine, buvo žemiau radionuklido aktyvumo registravimo ribos.

Išplautoje aerozolio dalelių bandinių, surinktų Ignalinos AE neveikiančio reaktoriaus ventiliaciniame ore, frakcijoje ^{137}Cs ir ^{60}Co aktyvumų santykiai su radionuklido aktyvumais pradiniuose bandiniuose – 24 % ir 20 %, atitinkamai – yra artimi vidutiniam kontinentinės oro masės aerozolio dalelių masės kiekiui tirpioje frakcijoje – 28 % (žr. 37 psl.) ir ^{137}Cs ir ^{60}Co aktyvumų santykiams, nustatytiems pažemio ore (žr. 20 lentelę).

Išplautoje aerozolio dalelių bandinių, surinktų Ignalinos AE veikiančio reaktoriaus ventiliaciniame ore, frakcijoje ^{137}Cs , ^{60}Co ir ^{54}Mn aktyvumų santykiai su radionuklido aktyvumais pradiniuose bandiniuose buvo 74 %, 67 % ir 69 %, atitinkamai ir juos galima palyginti su ^{137}Cs , ^{60}Co ir ^{54}Mn dalimi vandenyje tirpioje aerozolio dalelių frakcijoje Ignalinos AE veikiančio reaktoriaus ventiliaciniame ore: 78 %, 99 % ir 100 %, atitinkamai (žr. 38 psl.).

Radionuklidų aktyvumų bandiniuose prieš ir po išplovimo eksperimentų santykis tikriausiai atspindi santykį tarp radionuklidų, buvusių dalelių, kurių pagrindinė sudėtinė dalis buvo vandens molekulės, ir tarp radionuklidų, buvusių vandenyje netirpioje aerozolio dalelių frakcijoje, pasiliekančioje ant filtro.

Vandens virsmas garu ir garo kondensacija, esant persotintam slėgiui, vyksta tiktai veikiančiame reaktoriuje. Atominėje elektrinėje oras prieš patekdamas į ventiliacijos sistemą iš atmosferos yra filtruojamas. Ežektorinės dujos yra persotinti vandens garai, kur kitų priemaišų žymėsni kiekio nėra. Tirpių aerosolinių dalelių (su radioaktyviais branduoliais savo sudėtyje) susidarymui sąlygos čia itin palankios. Procesas analogiškas aerozolio dalelių susidarymui atmosferoje dalelių augimo epizoduose esant prisotintų vandens garų slėgiui.

Išplovimo eksperimente vyksta patekusių į vandenį stabilų ore (dėl paviršinių įtempimo jėgų) aerozolio dalelių, kurių pagrindinė sudėtinė dalis yra vandens molekulės, sugriovimas. Vandenyje molekulių šiluminis judėjimas suardo aerozolio dalelių paviršiuje esančių vandens molekulių išsidėstymą, dingsta paviršinio įtempimo jėgos ir aerozolio dalelių sudėtyje esančios vandens molekulės ir radionuklidai tiesiog atsiduria tirpale. Literatūros šaltiniuose aerozolio dalelės, susidariusios dėl vandens molekulių absorbcijos įvardijamos kaip tirpi aerozolio dalelių frakcija. Tokiu būdu, darbe gauti eksperimentiniai rezultatai gerai sutampa su literatūros šaltiniuose pateiktais aerozolio dalelių augimo prisotintuose vandens garuose epizodų aprašymais.

Darbe buvo atlikti papildomi aerozolio dalelių bandinių, surinktų Ignalinos AE veikiančio 2 bloko reaktoriaus ventiliacinės sistemos ore, išplovimo eksperimentai. Šių tyrimų tikslas buvo įvertinti aerozolio dalelių bandinių, surinktų skirtingose ventiliacinės sistemos dalyse, išplovimą radionuklidų kelyje nuo jų susidarymo vietos iki ventiliacinio kamino.

Aerozolio dalelių, surinktų filtrais Ignalinos AE veikiančio 2 bloko reaktoriaus ventiliaciniame ore, išplovimo eksperimentams buvo paimti aerozolio dalelių bandiniai iki išlaikymo kameros, po išlaikymo kameros, iki aktyvumo mažinimo įrenginio (žematemperatūrinių aktyvuotos anglies adsorberių) ir po aktyvumo mažinimo įrenginio 2008 metais.

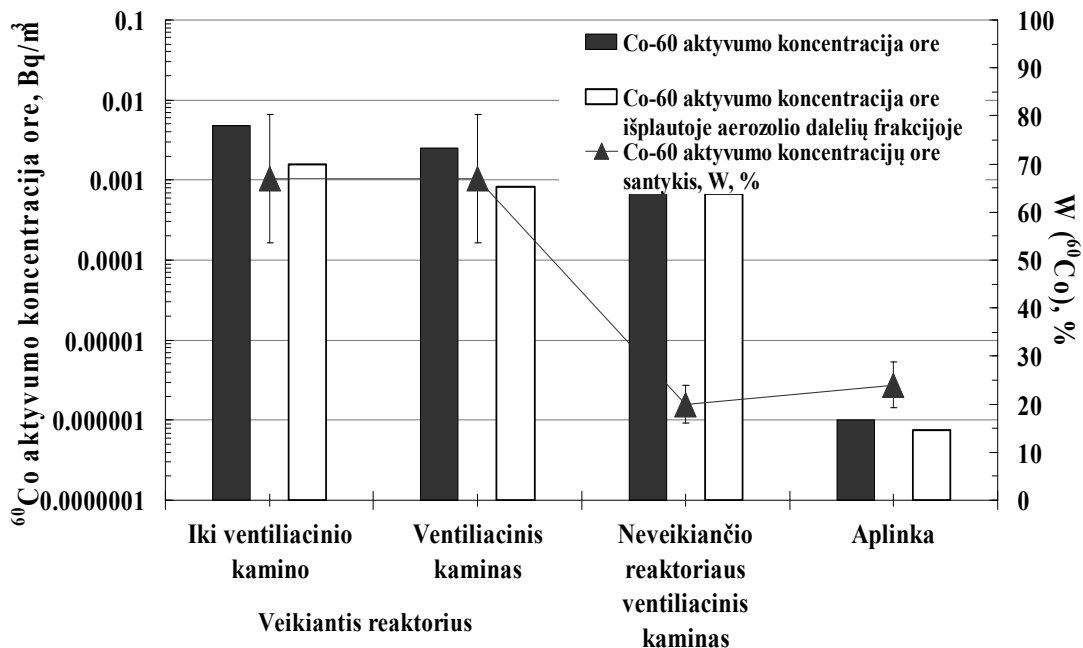
^{137}Cs ir ^{60}Co aktyvumai Ignalinos AE veikiančio 2 bloko reaktoriaus ventiliacinės sistemos oro aerozolio dalelių bandiniuose iki išplovimo eksperimento, A (mBq), ir po eksperimento, A_{nt} (mBq), bei išplautoje aerozolio dalelių bandinio frakcijoje radionuklidų aktyvumų santykiai su radionuklidų aktyvumais pradiniam bandinyje, W (%), pateikiami 22 lentelėje.

22 lentelė. ^{137}Cs ir ^{60}Co aktyvumai Ignalinos AE veikiančio 2 bloko reaktoriaus ventiliacinės sistemos oro aerozolio dalelių bandiniuose iki išplovimo eksperimento ir po išplovimo eksperimento bei išplautoje aerozolio dalelių bandinio frakcijoje radionuklidų aktyvumų santykiai su radionuklidų aktyvumais pradiniam bandinyje.

| Bandinio ėmimo vieta | ^{137}Cs | | | ^{60}Co | | |
|---------------------------------|-------------------|----------|------------|------------------|----------|-------------|
| | Aktyvumas, mBq | | W , % | Aktyvumas, mBq | | W , % |
| | A | A_{nt} | | A | A_{nt} | |
| Iki išlaikymo kameros | 23 300 | 7690 | 67 ± 5 | – | – | – |
| Po išlaikymo kameros | 4 530 | 910 | 80 ± 5 | 80 | 40 | 50 ± 10 |
| Iki aktyvumo mažinimo įrenginio | 80 | 30 | 63 ± 5 | 150 | 60 | 60 ± 10 |
| Po aktyvumo mažinimo įrenginio | 750 | 220 | 71 ± 5 | 120 | 40 | 67 ± 15 |

^{60}Co dalis tirpioje aerozolio dalelių, surinktų Ignalinos AE veikiančio bloko reaktoriaus ventiliacinės sistemos ore, frakcijoje buvo intervale nuo 50 iki 67 %. ^{137}Cs dalis tirpioje aerozolio dalelių, surinktų Ignalinos AE veikiančio bloko reaktoriaus ventiliacinės sistemos ore, frakcijoje buvo intervale nuo 67 iki 80 %. Gauti rezultatai artimi aerozolio dalelių, surinktų veikiančio 2 bloko reaktoriaus ventiliacinio kamino, išplovimo rezultatams (21 lentelė).

Akivaizdumo dėlei, aerozolio dalelių, ^{60}Co nešėjų, surinktų Ignalinos AE ventiliaciniame ore ir pažemio ore, išplovimo tyrimų rezultatai pavaizduoti grafiškai 41 pav.



41 pav. ^{60}Co aktyvumo koncentracijos ir ^{60}Co dalies neišplautoje aerozolio dalelių frakcijoje aktyvumo koncentracijos Ignalinos AE veikiančio reaktoriaus ventiliaciniame ore po aktyvumo mažinimo įrenginio (*iki ventiliacinio kamino*) ir ventiliacinio kamino ore (*ventiliacinis kaminas*), neveikiančio reaktoriaus ventiliacinio kamino ore bei pažemio ore (*aplinka*). Dešinėje skalėje pateikti ^{60}Co aktyvumo koncentracijos ore santykiai su ^{60}Co aktyvumo koncentracija ore išplautoje aerozolio dalelių frakcijoje, W (%).

Šie rezultatai rodo, kad Ignalinos AE veikiančio reaktoriaus ventiliacinėje sistemoje išplautoje aerozolio dalelių frakcijoje randama nuo 50 iki 80 % radionuklidų, kas patvirtina prielaidas apie aukščiau minėtą aerozolio dalelių augimą persotintuose vandens garuose po turbinos.

Po aktyvumo mažinimo įrenginio visų radionuklidų aktyvumo koncentracijos ženkliai sumažėja, bet išlieka nekintantis radionuklidų aktyvumų santykis išplautoje aerozolio dalelių frakcijoje ir pradiniame bandinyje (22 lentelė).

Aerozolio dalelių susidarymo atominėse elektrinėse branduolinio reaktoriaus dujų atskyrimo nuo kondensuoto vandens procese galima išvelgti panašumą su aerozolio dalelių susidarymo epizodais aplinkoje. Tikriausiai, aerozolio dalelių

augimo epizode virš Suomijos miškų [99] ir veikiančio Ignalinos AE reaktoriaus ventiliaciniame ore procesų panašumas yra tai, kad augimo priežastis yra vandens molekulių absorbcija ant susidariusių iš dujinės fazės dalelių.

5.3 Tirpių ir netirpių aerozolio dalelių pernešimas pažemio ore

^{60}Co dalis išplautoje aerozolio dalelių, surinktų veikiančio reaktoriaus ventiliaciniame ore, frakcijoje buvo 67 %, o surinktų pažemio ore buvo 24 %. Tikriausiai, tirpios ir netirpios aerozolio dalelės, ^{60}Co nešėjos, iš ventiliacinio kamino patekusios į pažemio orą, kur vandens garų koncentracija retai siekia sotiems garams būdingas reikšmes, sąveikauja su atmosferos aerozolio dalelėmis bei kitomis priemaišomis ore ir patiria savybių transformacijas. Dėl to ^{60}Co dalis išplautoje pažemio oro aerozolio dalelių frakcijoje sumažėja ir pasiekia reikšmes, būdingas kontinentinei oro masei.

Aerozolio dalelės, ^{60}Co nešėjos, gali būti laikomos pasyviomis priemaišomis pažemio oro turbulentiuose srautuose, ir pusiau empirinę Gauso lygtį (Pasquill-Gifford metodo dalis) [142, 143], aprašančią priemaišų pernešimą AE fakele, galime papildyti koeficientu, įvertinančiu aerozolio dalelių, ^{60}Co nešėjų, savybių kitimą oro masių judėjimo trajektorijoje nuo radionuklido emisijos šaltinio iki matavimo taško radionuklido emisijos šaltinio poveikio zonoje.

^{60}Co dalies tirpioje aerozolio dalelių frakcijoje kitimą laiko bėgyje, kai pažemio ore vyksta pernešimas iš AE kamino iki FI stoties, aprašome eksponentine funkcija F_R , analogiška funkcijai, aprašančiai radionuklidų skilimą, su pastoviu laipsnio rodikliu, kurį įvertiname iš eksperimentinių rezultatų, skaičiuodami pernešimo laiką proporcingą atstumo tarp AE kamino ir stoties x , m, bei vėjo greičio u , m/s, santykiui:

$$F_R = \exp - \frac{k_t x}{u}, \quad (19)$$

čia k_t – ^{60}Co dalies išplautoje aerozolio dalelių frakcijoje kitimo greičio konstanta (1/s).

Eksponentinę funkciją F_R galima laikyti funkcija, aprašančia tirpių aerozolio dalelių, ^{60}Co nešėjų, pašalinimą iš Ignalinos AE fakelo.

Tikslu įvertinti ^{60}Co aktyvumo koncentracijos ore pasiskirstymą tirpioje ir netirpioje aerozolio dalelių frakcijose, pusiau empirinę lygtį (Pasquill-Gifford metodo dalis) papildome koeficientu F_R :

$$C_{(x,y,z)} = Q \frac{F_x F_R}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h_{ef})^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h_{ef})^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}, \quad (20)$$

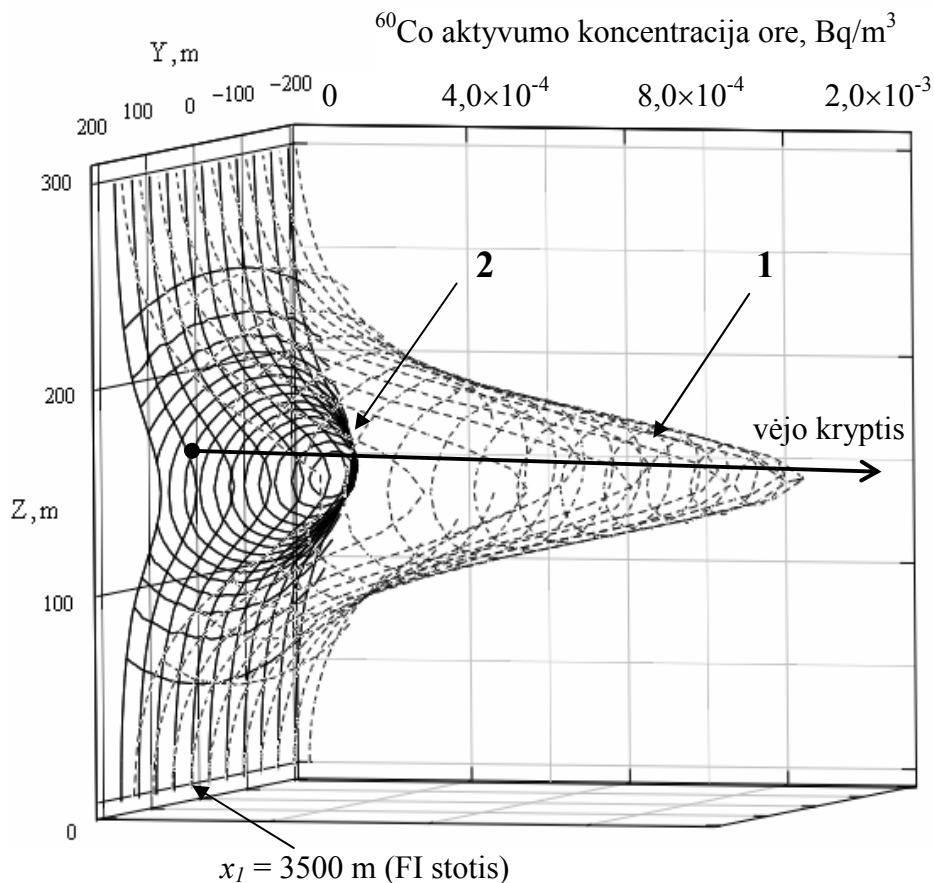
čia Q yra radionuklido emisijos greitis iš Ignalinos AE ventiliacinio kamino, Bq/s, σ_y ir σ_z yra standartiniai horizontalus ir vertikalus priemaišų pernešimo ore nuokrypiai, m, h_{ef} yra efektyvus išlėkų aukštis, m, u yra vėjo greitis, m/s, F_x yra koeficientas, įvertinantis radionuklido pasišalinimą iš fakelo dėl skilimo, F_R yra koeficientas, aprašantis ^{60}Co dalies mažėjimą tirpioje aerozolio dalelių frakcijoje Ignalinos AE fakele.

Lygtis (20) užrašyta stacionariems atvejams, kai radionuklido emisija ir meteorologinės sąlygos (svarbiausia – vėjo kryptis) nesikeičia kelių valandų bėgyje. Radionuklidų aktyvumo koncentracijų skaičiavimus atlikome koordinatinių sistemoje, kai x ašis susiejama su vėjo kryptimi, y ašis yra statmena vėjo krypčiai, z ašis yra statmena žemės paviršiui. Emisijos šaltinio padėties ant žemės paviršiaus taškas (vidurys tarp Ignalinos AE 1 ir 2 blokų) patalpinamas koordinatinių pradžioje (x_0, y_0, z_0). Matavimo stoties (FI stotis) padėties taškas aprašomas koordinatinių rinkiniu ($x_1, 0, 1$), kur $x_1 = 3500$ m. Radionuklido aktyvumo koncentracijos pažemio ore, $C_{(3500,y,z)}$, plokštumoje, statmenoje vėjo krypčiai FI stotyje, skaičiuojamos iki aukščio virš žemės paviršiaus kitimo intervale nuo 0 iki 300 m su 10 m žingsniu ir 20 m žingsniu statmenai vėjo krypčiai intervale nuo -200 iki 200 m.

Nagrinėjamu oro aerozolio dalelių bandinio ėmimo laikotarpiu 2007.06.06-18, iš Ignalinos AE kamino išlėkusios aerozolio dalelės, ^{60}Co nešėjos, galėjo būti pernešamos į FI stotį birželio 7-9 d. (pernašos trukmė 60 val.) ir birželio 10-11 d. (pernašos trukmė 30 val.). ^{60}Co emisijos greitis iš Ignalinos AE 1 ir 2 reaktoriaus blokų buvo 1,0 ir 1,8 Bq/s, atitinkamai. Pažemio oro aerozolio bandinio ėmimo laikotarpiu priemaišos dispersijos ore standartiniai vertikalūs nuokrypiai buvo vertinami, nustatant atmosferos stabilumo klasę iš lentelių pagal temperatūros 2 m ir 30 m aukščiuose skirtumo ir vėjo greičio santykį ir kito paros bėgyje 30-420 m

intervale, standartiniai horizontalūs nuokrypiai, σ_y , kito 80-440 m intervale. Vidutinis vėjo greitis u , regione buvo apie 2 m/s.

^{60}Co aktyvumo koncentracijos ore pasiskirstymo skaičiavimai pagal (20) lygtį buvo atliekami MathCad programos aplinkoje naudojant HYSPLIT modelio meteorologinių duomenų archyvo duomenis su reikšmėmis kas tris valandas. Buvo skaičiuojamas ^{60}Co aktyvumo koncentracijos ore pasiskirstymas y,z plokštumoje FI stoties atstume nuo elektrinės, kai neatsižvelgiama į pasiskirstymą tarp aerozolio dalelių frakcijų (koeficientas F_R neįvertinamas) ir kai radionuklidas yra tirpioje aerozolio dalelių frakcijoje (koeficientas F_R vertinamas). 42 pav. trimačiame grafike pateikti skaičiavimų rezultatai, atlikti 2007.06.06-18 aerozolio dalelių bandinio paėmimo laikotarpiui.



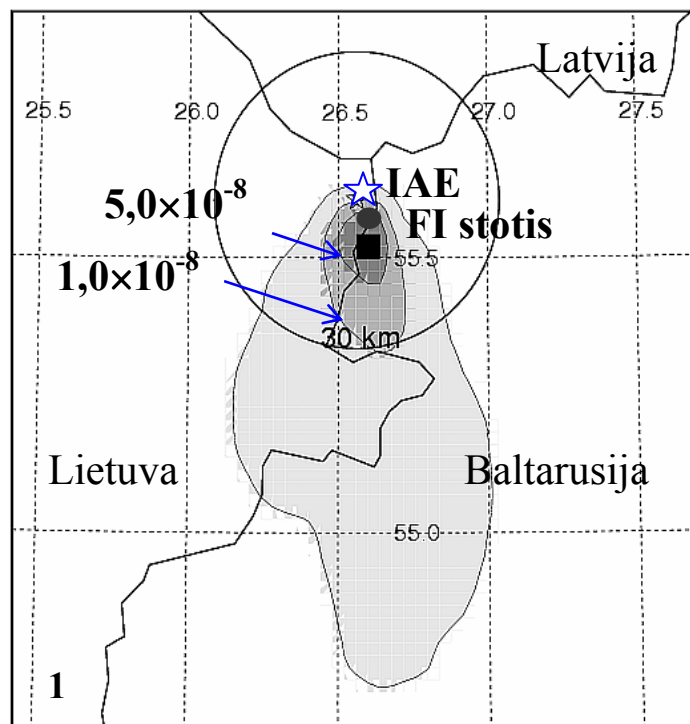
42 pav. ^{60}Co aktyvumo koncentracijos ore pasiskirstymas y,z plokštumoje FI stoties atstumu $x=3500$ m nuo elektrinės: 1 – neatsižvelgiama į pasiskirstymą tarp aerozolio dalelių frakcijų (koeficiento F_R kitimas nevertintas), 2 – kai radionuklidas yra tirpioje aerozolio dalelių frakcijoje (koeficiento F_R kitimas vertintas).

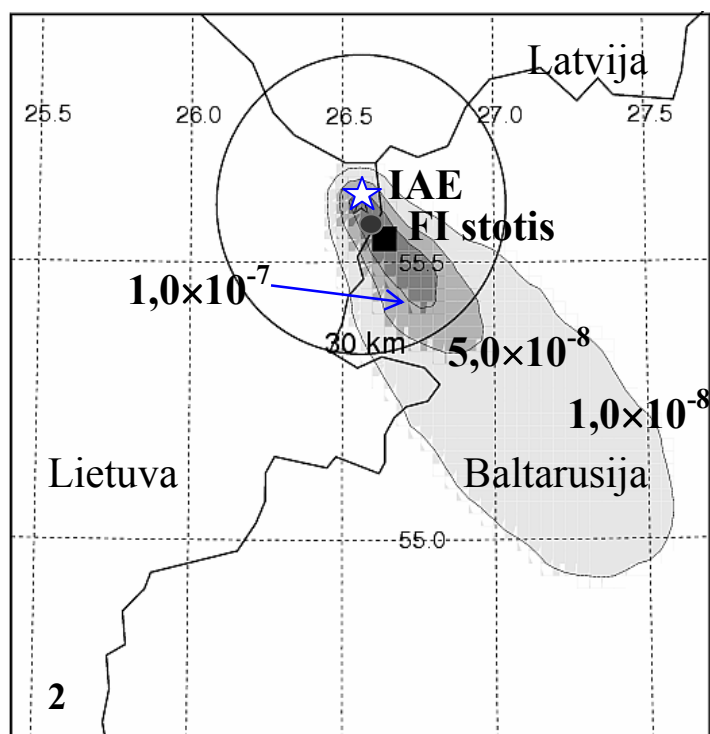
Didžiausia ^{60}Co aktyvumo koncentracija ore kamino aukštyje virš FI stoties $z = 150$ m ($x = 3500$, $y = 0$) buvo $1,5 \times 10^{-3}$ Bq/ m³, o pažemio oro aerozolio dalelių bandinio ėmimo taške ($x = 3500$ m, $y = 0$, $z = 1$) buvo $1,7 \times 10^{-6}$ Bq/m³.

Nagrinėjamu bandinio ėmimo laikotarpiu funkcija F_R buvo įvertinta radionuklido dalies tirpioje aerozolio dalelių, surinktų AE kaminuose ir pažemio ore, frakcijose skirtumui lygiam 0,25, o parametras k_t , įvertinant pernešimą 3,5 km atstumu su vėjo greičiu 2 m/s, gautas lygus $0,8 \times 10^{-3}$ 1/s.

Kaip buvo minėta, skaičiavimams buvo naudoti HYSPLIT modelio archyviniai meteorologiniai duomenys. Tačiau HYSPLIT modelis įgalina atlikti ir radionuklido dalies tirpioje ir netirpioje aerozolio dalelių frakcijų sumos dispersijos pažemio ore skaičiavimus. Buvo skaičiuoti atvejai, kai visam laikotarpiui ^{60}Co koncentracija išlėkose buvo pastovi, oro pernašos kryptis sutapo su kryptimi nuo elektrinės į matavimo stotį. Išlėkų aukštis 150 metrų, koncentracijų vertės pažemio ore vidurkintos valandai.

Radionuklido aktyvumo koncentracijų ore skaičiavimo rezultatai, taikant priemaišos pasiskirstymo ore ir iškritų globalų HYSPLIT modelį pateikti 43 pav.





43 pav. ^{60}Co aktyvumo koncentracijų pažemio ore, Bq/m^3 , pasiskirstymas Ignalinos AE regione 2007.06.7-9 d. (1) ir 06.11-12 (2). \star - Ignalinos AE, \bullet - FI stotis, \blacksquare - didžiausia radionuklido aktyvumo koncentracijos ore vertė ($1,8 \times 10^{-7} \text{ Bq}/\text{m}^3$ ir $1,6 \times 10^{-7} \text{ Bq}/\text{m}^3$, atitinkamai). Apskritimu pavaizduota IAE 30 km stebėjimo zona.

^{60}Co aktyvumo koncentracija pažemio ore Fizikos instituto stotyje 2007.06.6-18, apskaičiuota taikant Pasquill-Gifford metodą ($\sim 1.7 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) ir HYSPLIT modelį ($\sim 0,17 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) patenkinamai sutinka su eksperimentiniu ^{60}Co aktyvumo koncentracijos ore rezultatu ($0,5 \pm 0,1 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$).

SKYRIAUS IŠVADOS

1. ^{137}Cs ir ^{60}Co dalis išplautoje aerozolio dalelių, surinktų veikiančio reaktoriaus ventiliaciniame ore, frakcijoje buvo $74 \pm 22 \%$ ir $67 \pm 17 \%$, atitinkamai, o neveikiančio reaktoriaus ventiliaciniame ore – $24 \pm 5 \%$ ir $20 \pm 5 \%$, atitinkamai.
2. ^{60}Co aktyvumo koncentracijos ore ir išplautoje aerozolio dalelių frakcijoje su kintančiu laike ir erdvėje santykiu pasiskirstymas AE fakele apskaičiuotas, papildant pusiau empirinę Pasquill-Gifford lygtį koeficientu, aprašančiu tirpių aerozolio dalelių, ^{60}Co nešėjų, pašalinimą.

DARBO REZULTATAI

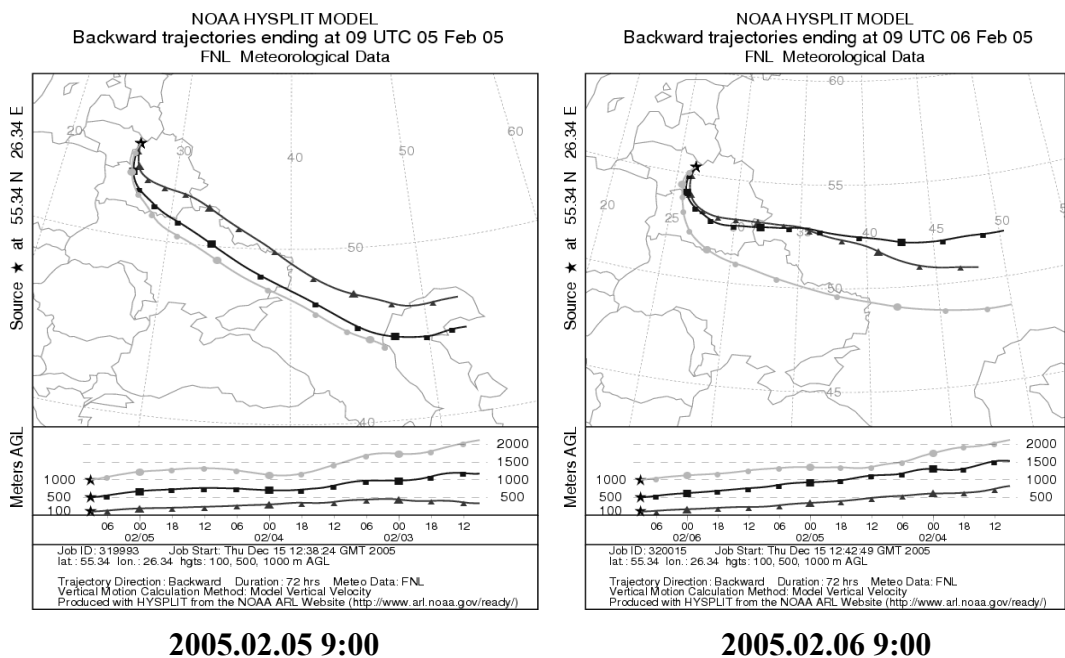
1. Metinių ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore kaita regione 1988-2008 m. aprašyta eksponentine funkcija su mažėjimo pusiau trukme $T_{1/2} \cong 30$ metų.
2. Vidutinė ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos iškritose Ignalinos AE aplinkoje 2005-2008 m. reikšmė gauta lygi $1,1 \text{ Bq}/(\text{m}^2 \text{ mėnuo})$.
3. Šuoliški ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų pažemio ore padidėjimai koreliuoja su oro masių pernašos trajektorijomis, kertančiomis teritorijas, užterštas po avarijos Černobylio AE iki šiol liekančias ^{137}Cs patekimo į orą šaltiniu.
4. Vieno kontūro atominės elektrinės aušinamame vandens gare inertinių dujų radionuklidai, skildami virsta šarminių ir žemės šarminių metalų elementais, tampa aerozolio gamybos centrais, absorbuoja vandens molekules ir per keliolika minučių ant jų, kaip kondensacijos branduolių, išauga radioaktyvios aerozolio dalelės.
5. ^{137}Cs ir ^{60}Co dalis išplautoje aerozolio dalelių, surinktų veikiančio reaktoriaus ventiliaciniame ore, frakcijoje buvo $74 \pm 22 \%$ ir $67 \pm 17 \%$, atitinkamai, o neveikiančio reaktoriaus ventiliaciniame ore – $24 \pm 5 \%$ ir $20 \pm 5 \%$, atitinkamai.
6. ^{60}Co aktyvumo koncentracijos ore ir išplautoje aerozolio dalelių frakcijoje su kintančiu laike ir erdvėje santykiu pasiskirstymas AE fakele apskaičiuotas, papildant pusiau empirinę Pasquill-Gifford lygtį koeficientu, aprašančiu tirpių aerozolio dalelių, ^{60}Co nešėjų, pašalinimą.

1 priedas. ¹³⁷Cs aktyvumo koncentracijų ore padidėjimų Ignalinos AE regione 2005-2006 metais analizė

Pateikiama ¹³⁷Cs aktyvumo koncentracijų ore padidėjimų Ignalinos AE regione 2005-2006 metais analizė. Laikotarpiais, kai registruoti ¹³⁷Cs aktyvumo koncentracijų ore padidėjimai, buvo skaičiuojamos 72 valandų (vidutinio sinoptinio periodo) trukmės atgalinės oro masių pernašos trajektorijos (trijuose aukščiuose: 100, 500 ir 1000 m) link FI stoties kas 6 valandas.

2005 metai

2005 metais ¹³⁷Cs aktyvumo koncentracija ore $6,9 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ buvo stebėta 2005.02.05 - 02.19 laikotarpiu. Tai nebuvo šuoliškas koncentracijos padidėjimas. Didesnės nei globalinį pasiskirstymą atspindinčios reikšmės buvo stebėtos visą vasario mėnesį. Atlikus atgalinių oro masių judėjimo trajektorijų skaičiavimus, nustatyta, kad 2005 m. vasario mėn. pirmos pusės oro masių pernašos trajektorijos kirtė potencialų stebimo radionuklido ¹³⁷Cs šaltinį – Ukrainos pasienyje veikusios Černobylio AE užterštus plotus (44 pav.).

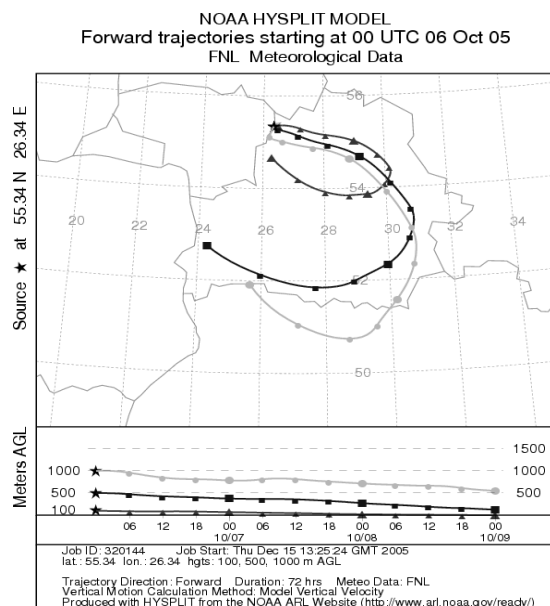


44 pav. Į Ignalinos rajoną atneštų oro masių judėjimo trajektorijos, pasiekusios matavimo stotį 2005.02.05 9:00 (1) ir 2005.02.06 9:00 (2).

^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore padidėjimas ilgesnį laiką buvo stebimas ir 2005 metų spalio mėnesį. Laikotarpiu nuo 2005.10.02 iki 2005.11.05 oro masių judėjimo trajektorijos beveik visą laiką kirtu potencialų ^{137}Cs šaltinį – po avarijos Černobylio AE labiausiai užterštus regionus (45 pav.). Pažemio oro pernašos trajektorijos keletą atvejų ėjo tiesiai per ketvirtą Černobylio AE bloką uždengtą sarkofagu.

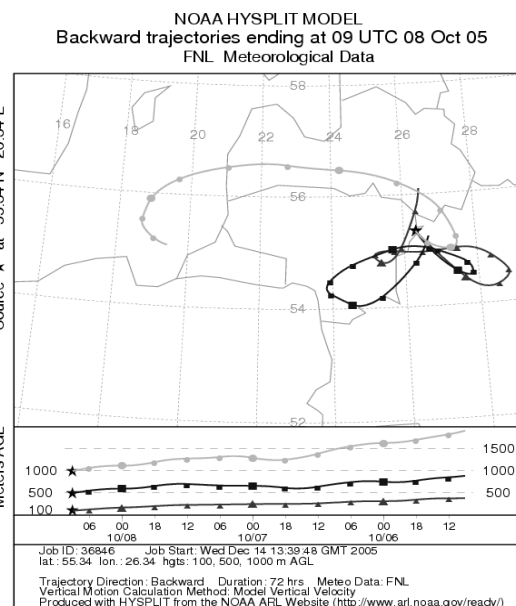
Tikriausiai, atskirais laikotarpiais, esant mažiems vėjų greičiams iš rytų į regioną atkeliavusios oro masės ištisas valandas pasilikdavo regione. Meteorologinės sąlygos buvo palankios padidintų ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore susidarymui.

^{137}Cs aktyvumo koncentracijos pažemio ore padidėjimo laikotarpiu 2005 m. spalio 30 d. – lapkričio 5 d. virš gretimų teritorijų įsivyravo galingas anticiklonas. Tikriausiai, anticikloninės sąlygos galėjo sudaryti palankias sąlygas ^{137}Cs pernašai iš radionuklidu užterštų teritorijų. Taip būtų galima paaiškinti kitus ^{137}Cs šuoliškus aktyvumo koncentracijų ore padidėjimus rudenį ir žiemą.



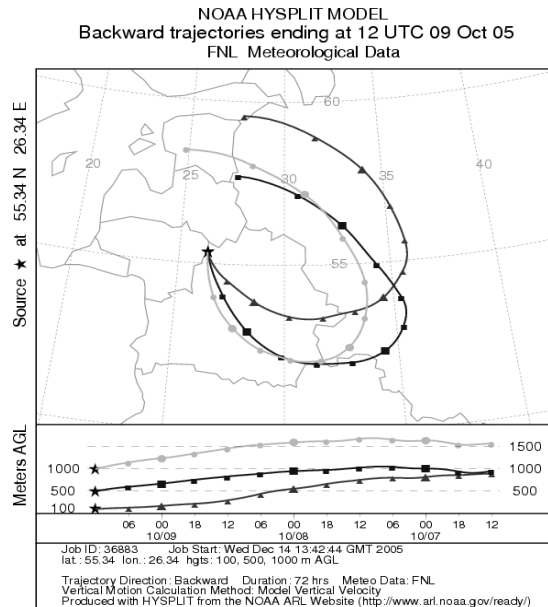
2005.10.06 00:00

1

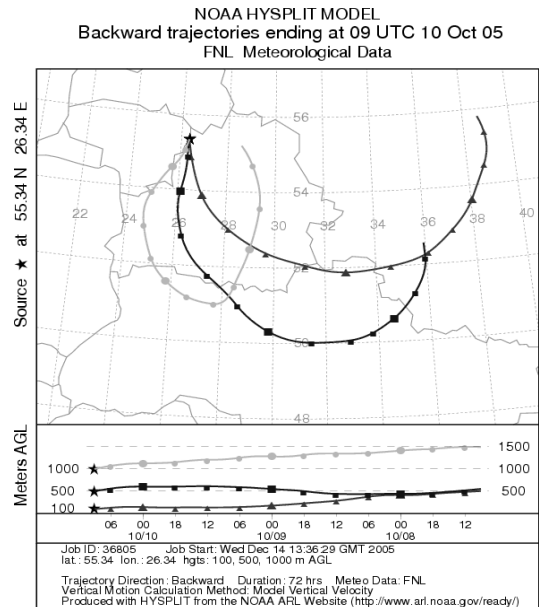


2005.10.08 09:00

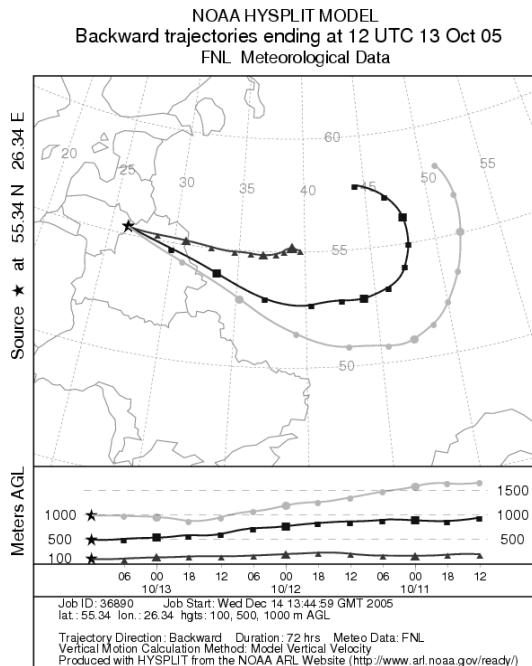
2



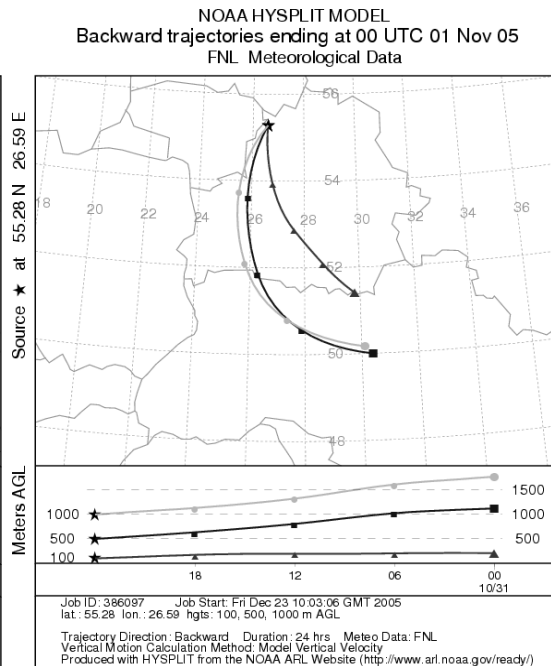
2005.10.09 12:00
3



2005.10.10 09:00
4

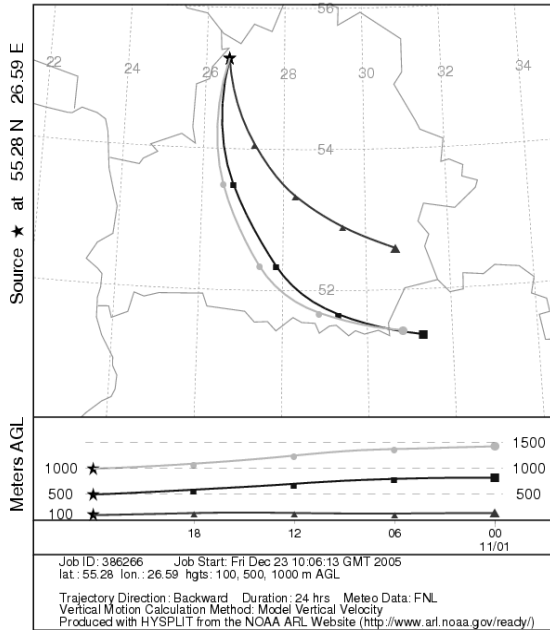


2005.10.13 12:00
5



2005.11.01 00:00
6

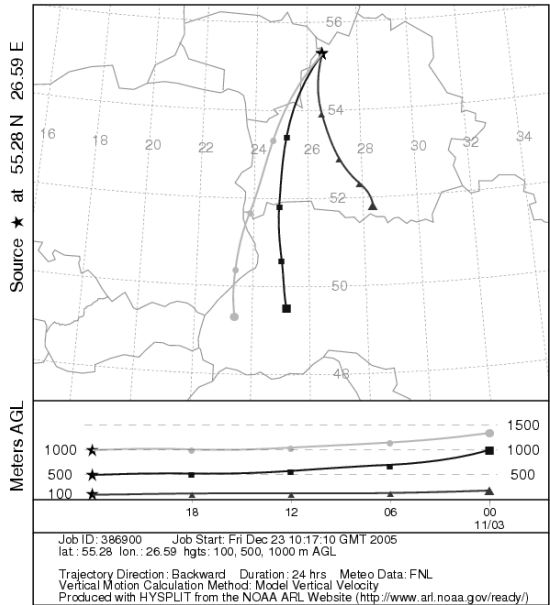
NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 00 UTC 02 Nov 05
FNL Meteorological Data



2005.11.02 00:00

7

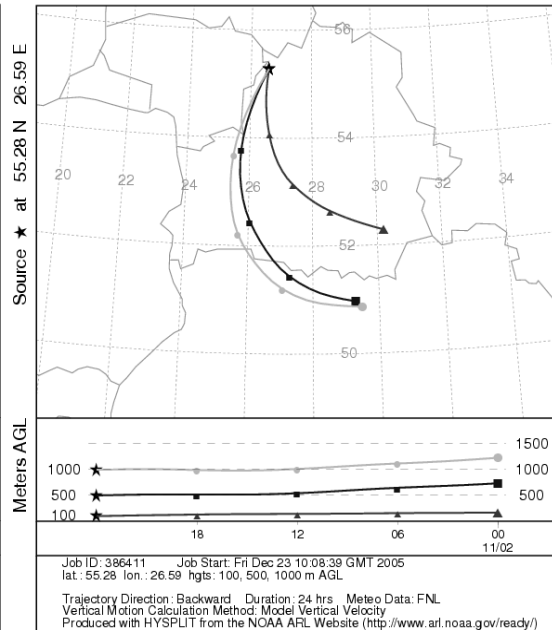
NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 00 UTC 04 Nov 05
FNL Meteorological Data



2005.11.04 00:00

9

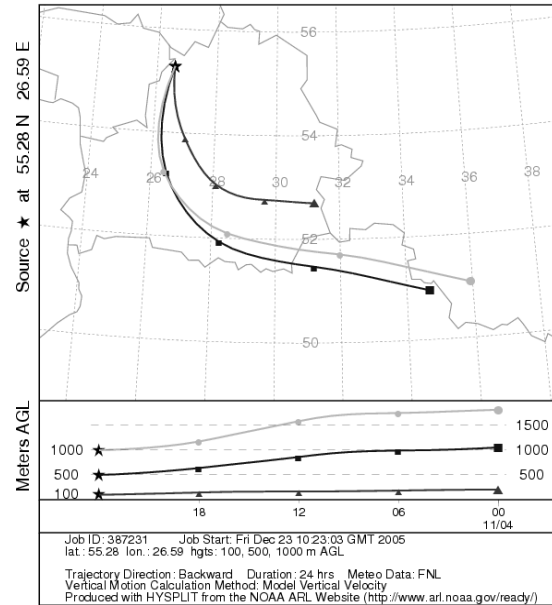
NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 00 UTC 03 Nov 05
FNL Meteorological Data



2005.11.03 00:00

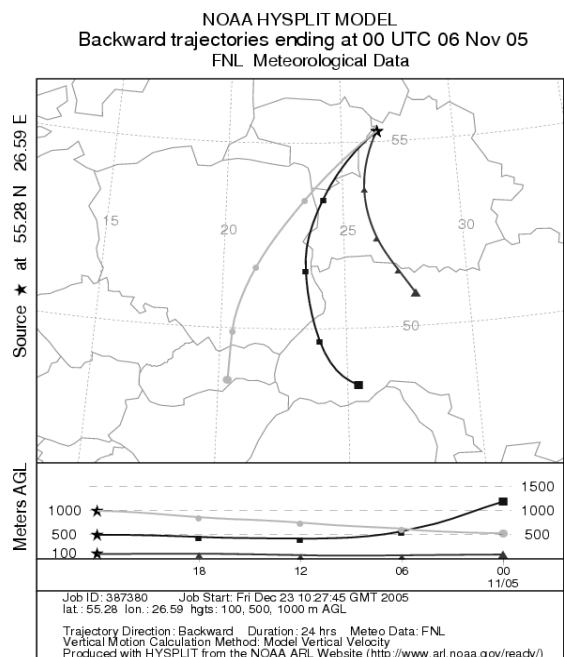
8

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 00 UTC 05 Nov 05
FNL Meteorological Data



2005.11.05 00:00

10



2005.11.06 00:00
11

45 pav. Į Ignalinos rajoną atneštų oro masių judėjimo trajektorijos, pasiekusios matavimo stotį 2005.10.06, 10. 08-13 ir 11.01-06.

2006 metai

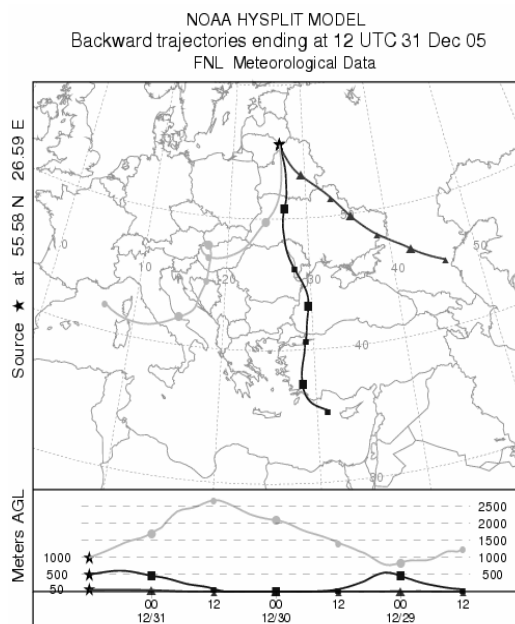
2006 metais užregistruotam ^{137}Cs aktyvumo koncentracijos padidėjimui iki $8.9 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ 2005.12.31 - 2006.01.07 paaiškinti atlikta virš 10 atgalinių oro masių trajektorijų skaičiavimų (46 pav., 1-5).

Įdomi meteorologinė situacija susiklostė jubiliejinio bandinio Nr. 3000 paėmimo laikotarpiu 2006.04.15-23 (46 pav., 6-11). Šiuo laikotarpiu buvo užregistruota maksimali per pastaruosius metus ^7Be aktyvumo koncentracija ore $13,5 \text{ mBq}/\text{m}^3$ ir viena didesnių ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų per stebėjimo laikotarpį $10,0 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$. Šio laikotarpio pradžioje vyravo vakarų krypčių oro masių pernaša, o pabaigoje buvo stebima pernaša iš šiaurės pagal meridianą su oro masių nusileidimu iš didesnio aukščio į pažemio sluoksnį. Tai lėmė maksimalių ^7Be aktyvumo koncentracijų pažemio ore formavimąsi. Oro masių kelyje į bandinių paėmimo stotį patenka Leningrado ir Ignalinos atominės elektrinės - potencialūs ^{137}Cs šaltiniai. Meridianinė pernaša iš šiaurės su oro masių nusileidimu iš didesnių aukščių yra palanki padidintų ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų ore susidarymui. Toks oro masių pernašos pobūdis susiformuoja bent vieną kartą beveik kasmet.

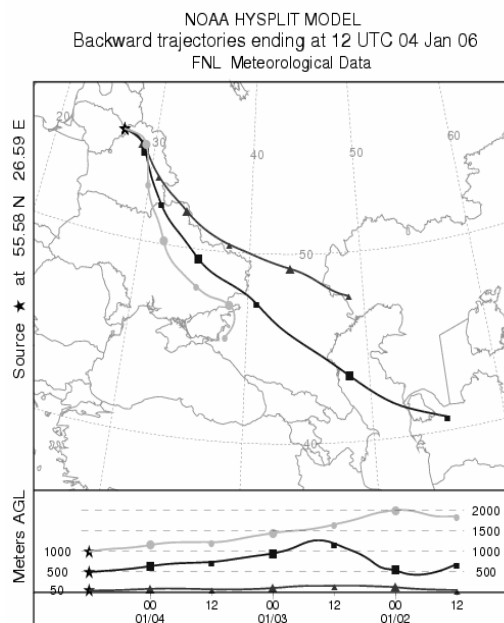
Tačiau atgalinių oro masių judėjimo trajektorijų analizės pagrindu susieti ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų pažemio ore padidėjimą 2006.04.15-23 su radionuklido pernaša su oro masėmis iš avarijos Černobylio AE užterštų teritorijų griežtai

nepavyksta. Šis atvejis gali būti susijęs ir su artimąja radionuklido pernaša dėl masinių pievų ir miškų gaisrų Lietuvoje. 2006.04.15-23 Lietuvoje tada išdegė 8120 ha bendras pievų ir miškų plotas, iš jų vien tik Utenos ir Vilniaus rajonuose išdegė 4100 ha.

2006.11.18-24 užregistruota ^{137}Cs aktyvumo koncentracija ore $7,7 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (46 pav., 12-18). Šiuo laikotarpiu registruota ^{137}Cs aktyvumo koncentracija vertinta, kaip šuoliškas ^{137}Cs aktyvumo koncentracijų padidėjimas, ir atlikti nešamų į Ignalinos rajoną oro masių trajektorijų skaičiavimai. Kaip matyti iš paveikslų praktiškai per visą bandinių rinkimo laikotarpį oro masių pernašos pobūdis beveik nekito ir buvo palankus ^{137}Cs atnešimui iš rajonų, užterštų po Černobylio avarijos. Tikėtina, kad registruojamas radionuklidas į filtrą pateko iš ^{137}Cs užterštų rajonų po antrinio jo patekimo į orą.

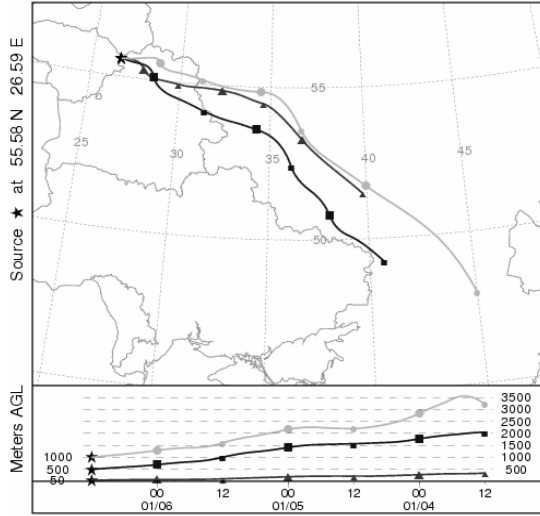


1



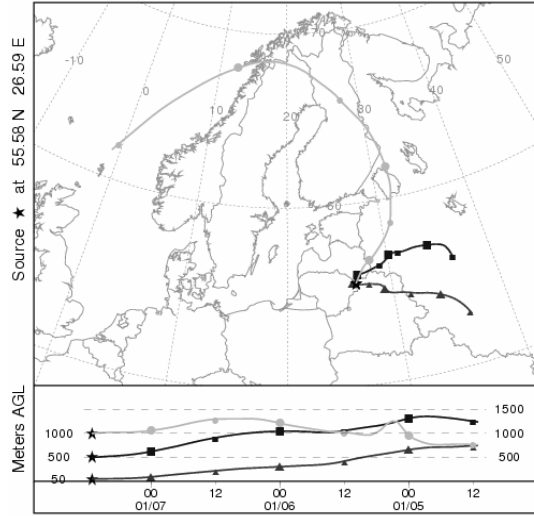
2

NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectories ending at 12 UTC 06 Jan 06
 FNL Meteorological Data



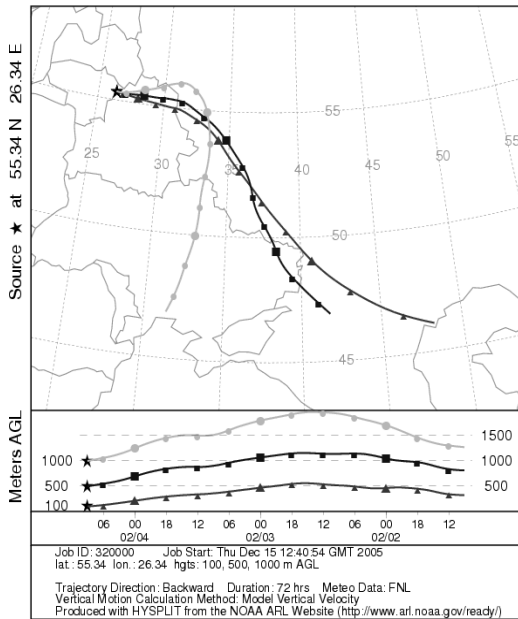
2006.01.06 12:00
3

NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectories ending at 11 UTC 07 Jan 06
 FNL Meteorological Data



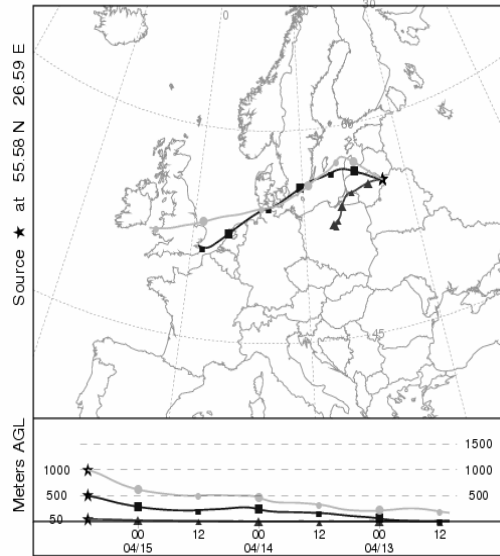
2006.01.07 11:00
4

NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectories ending at 09 UTC 04 Feb 05
 FNL Meteorological Data

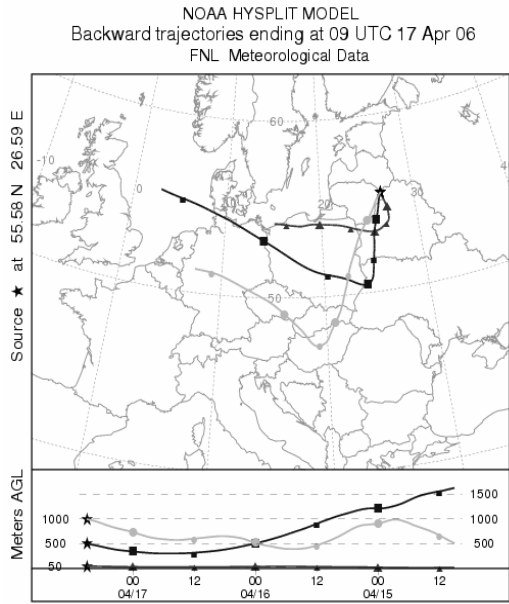


2006.02.04 9:00
5

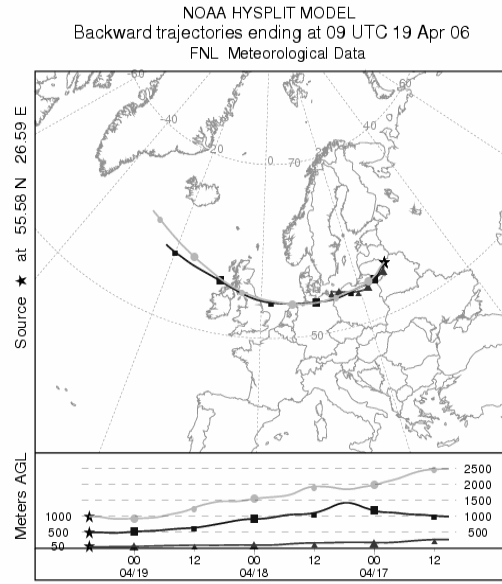
NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectories ending at 10 UTC 15 Apr 06
 FNL Meteorological Data



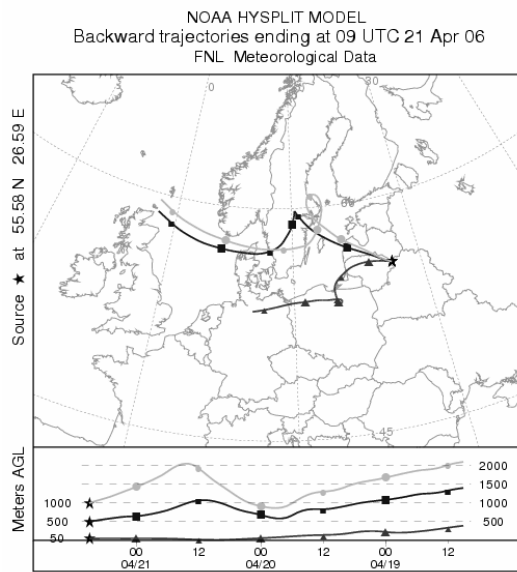
2006.04.15 10:00
6



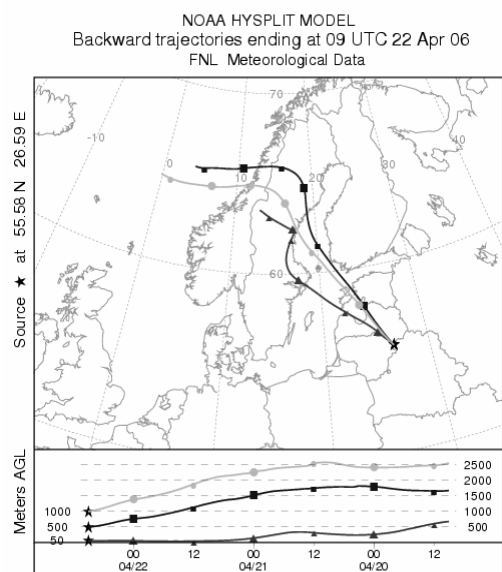
7



8

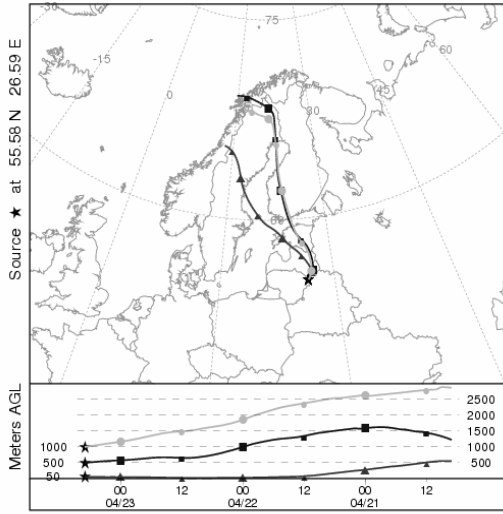


9



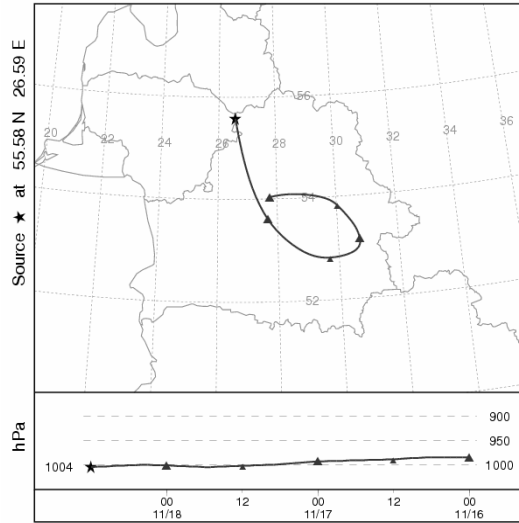
10

NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectories ending at 07 UTC 23 Apr 06
 FNL Meteorological Data



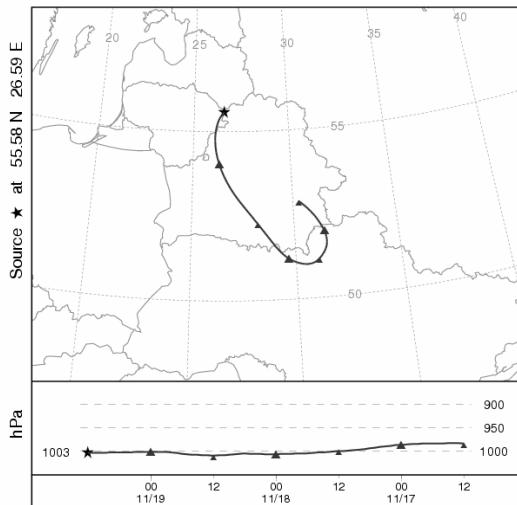
2006.04.23 07:00
11

NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectory ending at 12 UTC 18 Nov 06
 FNL Meteorological Data



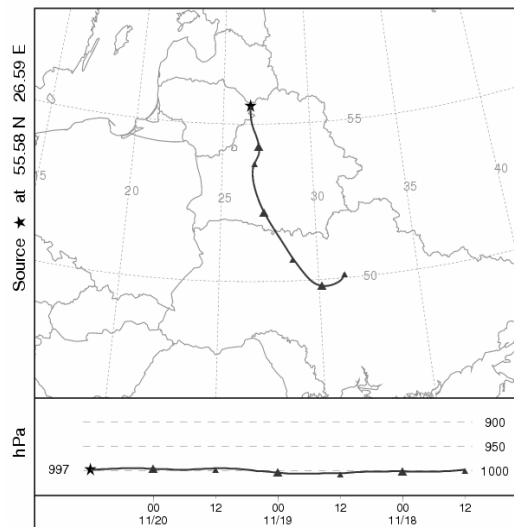
2006.11.18 12:00
12

NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectory ending at 12 UTC 19 Nov 06
 FNL Meteorological Data

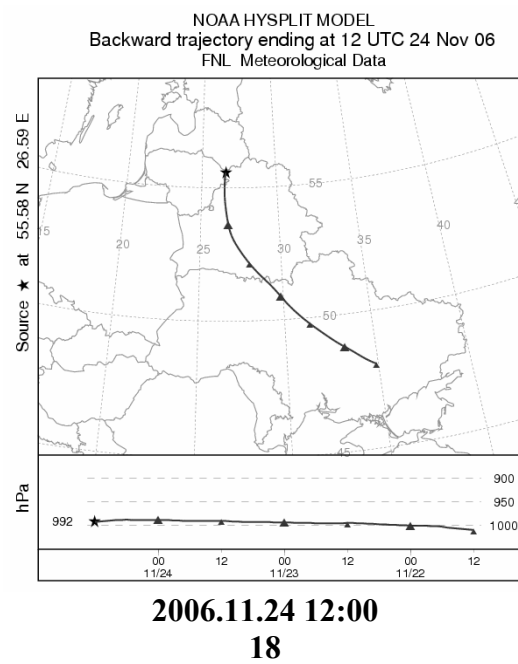
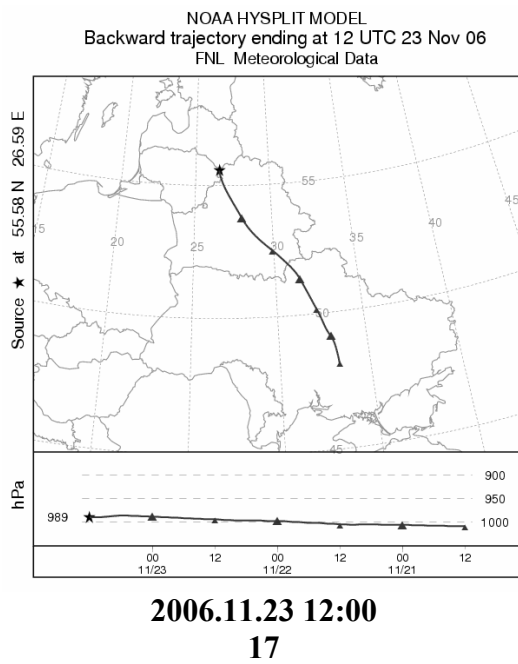
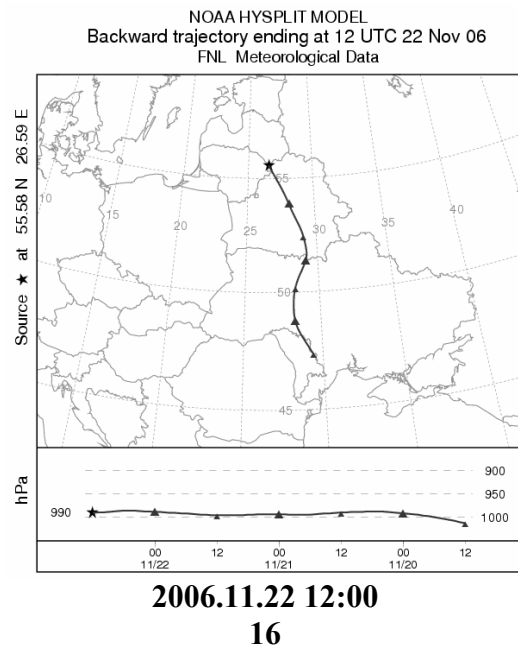
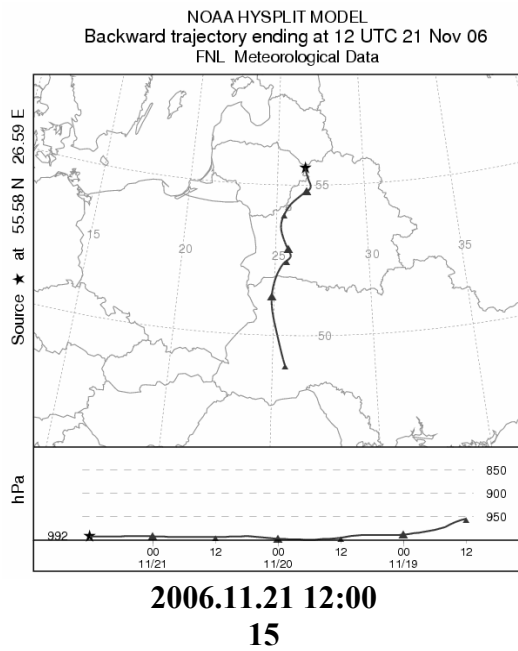


2006.11.19 12:00
13

NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectory ending at 12 UTC 20 Nov 06
 FNL Meteorological Data



2006.11.20 12:00
14



46 pav. Į Ignalinos rajoną atneštų oro masių judėjimo trajektorijos, pasiekusios matavimo stotį 2005.12.31-2006.01.07, 2006.02.04, 2006.04.15-23, 2006.11.18-24.

LITERATŪRA

- [1] V. Valkovic. Radioactivity in the Environment. Elsevier, 681 p. (2000).
- [2] B. Styra. Branduolinės meteorologijos klausimai. Vilnius: LTSR Mokslų Akademija, 418 p. (1959).
- [3] Nuclear geophysics and its application. Technical reports series 393. International Atomic Energy Agency, 200 p. (1999).
- [4] M. Eisenbud, T. Gesell. Environmental Radioactivity. From Natural, Industrial, and Military Sources. Elsevier, 656 p. (1997).
- [5] L. Morawska. From nanoparticles to large expiratory droplets in indoor air. European Aerosol Conference, 2007.09.09-14, Salzburg. Plenary lecture (2007).
- [6] P. Murry. Nucleation and growth of atmospheric particles: Processes and atmospheric effect. European Aerosol Conference, 2008.08.24-29, Thessaloniki. Plenary lecture (2008).
- [7] Л. Ивлев. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Ленинград: Издательство Ленинградского университета, 368 p. (1982).
- [8] S. Pryor, M. Gallacher, H. Sievering, S. Larsen, R. Barthelmie, F. Birsan, E. Nemitz, J. Rinne, M. Kulmala, T. Gronholm, R. Taipale, T. Vesala. A review of measurement and modelling results of particle atmosphere-surface exchange. Tellus 60B (1), 42-75 (2008).
- [9] А. Гиргждис, В. Улявичюс, А. Юозайтис. Исследование изменений дисперсности атмосферных аэрозолей. Физика атмосферы 12, 112-120 (1988).
- [10] M. Kulmala, L. Pirjola, J. Makela. Stable sulphate clusters as a source of new atmospheric particles. Nature, 66-69 (2000).
- [11] K. Šopauskas, B. Styra, E. Vėbra, B. Vėbrienė, S. Šalavėjus, D. Šopauskienė. Apie dirbtinai įvestų į debesį radioaktyvių izotopų išsiplovimo pobūdį antžeminių stebėjimo stočių duomenimis. Atmosferos valymosi nuo radioaktyvių izotopų procesų tyrimai. Vilnius: Mintis, 332-343 (1968).
- [12] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. Vol. 1. Sources. Annex C. Exposures from man-made sources of radiation, 134 p. (2000).
- [13] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. Vol. 2. Effects. Annex J. Exposures and effects of the Chernobyl accident, 115 p. (2000).
- [14] Р. Ясюленис, Р. Кренявичюс, Л. Милошене, А. Серапинас. О распределении концентраций ^{137}Cs и ^7Be в атмосферном воздухе в районе строящейся Игналинской АЭС. Проблемы исследования загрязнения атмосферы Физика атмосферы 7, 61-65 (1981).
- [15] R. Jasiulionis. Radionuklidų srautų Ignalinos AE aplinkoje įvertinimas. Lietuvos valstybinės mokslo programos "Atominė energetika ir aplinka" mokslinių ataskaitų rinkinys. Vilnius, 1-40 (1997).
- [16] R. Jasiulionis, I. Savickaitė. Radionuclides in ground-level air and deposits near the Ignalina NPP. Nukleonika 46 (4), 183-187 (2001).
- [17] E. Garger, A. Sazhenyuk, A. Odintzov, H. Paretzke, P. Roth, J. Tschiersch. Solubility of airborne radioactive fuel particles from the Chernobyl reactor and implication to dose. Radiation and Environmental Biophysics 43, 43-49 (2004).

- [18] NuDat 2.4. Nuclear structure and decay data database. <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/index.jsp>.
- [19] Ю. Израэль. Мирные ядерные взрывы и окружающая среда. Ленинград: Гидрометеиздат, 135 p. (1974).
- [20] Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization. <http://www.ctbto.org/>.
- [21] J Kang, P. Hayes. Technical Analysis of DPRK Nuclear Test. Nautilus institute <http://www.nautilus.org/fora/security/0689HayesKang.html> (2006).
- [22] А. Марей, Р. Бархударов, В. Книжников, Б. Борисов, Э. Петухов, Н. Новикова. Глобальные выпадения продуктов ядерных взрывов как фактор облучения человека. Москва: Атомиздат, 188 p. (1980).
- [23] Л. Гедеонов, М. Жилкина, З. Гритченко, В. Флегмонтов. К вопросу о формах нахождения радионуклидов в атмосферных осадках. Исследование процессов самоочищения атмосферы от радиоактивных изотопов Вильнюс: Минтис, 181-190 (1968).
- [24] В. Hicks. Nucleation and the wet removal of fallout. *Journal of Applied Meteorology* 5, 169-174 (1966).
- [25] F. Raes, R Dingenen, E. Vignati, J. Wilson, J. Putaud, J. Seinfeld, P. Adams. Formation and cycling of aerosols in the global troposphere. *Atmospheric Environment* 34, 4215-4240 (2000).
- [26] В. Луюнас, П. Зинкявичюс. Высота тропопаузы и временной ход концентраций космогенных изотопов в тропосфере. Радиоактивность атмосферы и гидросферы. Радиоактивные трассеры. *Физика атмосферы* 3 (1977).
- [27] Ю. Израэль. Радиоактивное загрязнение природных сред в результате аварии на Чернобыльской атомной станции. *Комтехпринт*, 28 p. (2006).
- [28] Р. Ясюленис, Г. Шнеа, А. Гудялис, Л. Милошене. Радиационное состояние атмосферы на северо-востоке Литвы после аварии на Чернобыльской АЭС. *Физика атмосферы* 15, 54-64 (1991).
- [29] Y. Hatano, N. Hatano, H. Amano, T. Ueno, A. Sukhorukin, S. Kazakov. Aerosol migration near Chernobyl: long-term data and modeling. *Atmospheric Environment* 32 (14/15), 2587-2594 (1998).
- [30] A. Borovoi, A. Gagarinskii. Emission of radionuclides from the destroyed unit of the Chernobyl nuclear power plant. *Atomic Energy* 90 (2), 153-161 (2001).
- [31] The French-German Initiative for Chernobyl. Study of the radiological consequences. Moeker-Merkur Druck GmbH, 112 p. (2005).
- [32] Э. Пазухин. Горение графита реактора 4-го энергоблока во время активной стадии аварии на Чернобыльской АЭС. Возможный вариант сценария. *Радиохимия* 50 (2), 188-192 (2008).
- [33] Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation. Twenty years of experience. IAEA radiological assessment report series. International Atomic Energy Agency, 180 p. (2006).
- [34] N. Talerko. Mesoscale modelling of radioactive contamination formation in Ukraine caused by the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity* 78 (3), 311-329 (2005).
- [35] The French-German Initiative for Chernobyl. Safety state of the Sarcophagus. Moeker-Merkur Druck GmbH, 70 p. (2005).
- [36] E. Kuzmina. Nuclear fuel and the characteristics of aerosol formation in the object "Cover". *Atomic Energy* 82 (1), 38-43 (1997).

- [37] G. Pretzch. Radiological hazards at the Chernobyl Shelter Site (7c13). Proceedings in 11th International Congress of the International Radiation Protection Association. May 23-28, 2008, Madrid. (2004).
- [40] B. Ogorodnikov, A. Budyka. Monitoring radioactive aerosols in the object "Cover". Atomic Energy 92 (6), 1016-1020 (2001).
- [41] B. Ogorodnikov. Origin and components of radioactive aerosols on the cover site at the Chernobyl nuclear power plant. Atomic Energy 93 (5), 917-922 (2002).
- [42] B. Ogorodnikov, A. Budyka, N. Pavliuchenko. Observation of radioactive aerosol emissions from the Sarcophagus at the Chernobyl nuclear power plant. Atomic Energy 96 (3), 202-213 (2004).
- [43] E. Garger, J. Tschiersch. Chernobyl aerosol in 1986-2004. The International Conference "Twenty Years after Chernobyl Accident. Future outlook." April 24-26, 2006, Kyiv (2006).
- [44] B. Ogorodnikov, A. Budyka, E. Pazukhin, A. Krasnov. Aerosol emissions from the destroyed power-generating unit of the Chernobyl nuclear power plant in 1986 and 2003-2005. Atomic Energy 100 (4), 276-282 (2006).
- [45] A. Budyka, B. Ogorodnikov. Radioactive aerosols of Chernobyl origin in 1986-2007. European Aerosol Conference, 2008.08.24-29, Thessaloniki. Poster session T07A020P (2008).
- [46] The International nuclear event scale. International Atomic Energy Agency. <http://www-ns.iaea.org/tech-areas/emergency/ines.htm> (2008).
- [47] International Atomic Energy Agency. Nuclear power reactors in the world. Vienna: IAEA, 77 p. (2008).
- [48] G. Rosner, R. Winkler. Temporal variation of post-Chernobyl ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu and $^{239,240}\text{Pu}$ concentrations in air and depositions to ground in South Germany from 1986 to 1998. Science of the Total Environment 273 (1-3), 11-25 (2001).
- [49] Y. Hatano, N. Hatano. Formula for the resuspension factor and estimation of the date of surface contamination. Atmospheric Environment 37, 3475-3480 (2003).
- [50] Б. Годун, С. Киреев, С. Обризан. К вопросу о минимизации процессов загрязнения приземного слоя атмосферы зоны Отчуждения основными источниками радиоактивных аэрозолей. Международная конференция "Двадцать лет Чернобыльской катастрофы. Взгляд в будущее". Апрель 24-26, 2006, Киев. (2006).
- [51] Б. Годун, В. Деревец, С. Киреев, С. Обризан. Влияние опасных природных явлений и процессов в зоне отчуждения на радиоактивное загрязнение окружающей среды. Международная конференция "Двадцать лет Чернобыльской катастрофы. Взгляд в будущее". Апрель 24-26, 2006, Киев. (2006).
- [52] В Чернобыльской зоне возник пожар. Сообщение информационного агентства РБК-Украина. 2007.03.22 (2007).
- [53] В. Холландер, Е. Гаргер. Загрязнение поверхностей за счет ветрового подъема радиоактивных аэрозолей. Заключительный отчет. (1996).
- [54] V. Kashparov, S. Lundin, A. Kadygrib, V. Protsak, S. Levtschuk, V. Yoschenko, V. Kashpur, N. Talerko. Forest fires in the territory contaminated as a result of the Chernobyl accident: radioactive aerosol resuspension and exposure of fire-fighters. Journal of Environmental Radioactivity 51, 281-298 (2000).

- [55] V. Yoschenko, V. Kashparov, Protsak. V, S. Lundin, S. Levchuk, A. Kadygrib, S. Zvarich, Y. Khomutinin, I. Maloshtan, V. Lanshin, M. M.V. Kovtun, J. Tschiersch. Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone: part I. Fire experiments. *Journal of Environmental Radioactivity* 86, 143-163 (2006).
- [56] В. Шевчук, В. Гурачевский. 20 лет после Чернобыльской катастрофы: последствия в Республике Беларусь и их преодоление. Национальный доклад. Комитет по проблемам последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС при Совете Министров Республики Беларусь, 112 p. (2006).
- [57] Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamentas prie VRM. <http://www.vpgt.lt> (Meniu - Paros įvykiai). (2008).
- [58] C. Fogh, K. Andersson. Dynamic behaviour of ^{137}Cs contamination in trees of the Briansk region, Russia. *The Science of the Total Environment* 269, 105-115 (2001).
- [59] Н. Улюмджиева, Н. Чубарова, Б. Холбец. Оптические свойства атмосферного аэрозоля в период лесных пожаров 2002 г. в Московском регионе. *Метеорология и гидрология* 3, 45-52 (2005).
- [60] Э. Пазухин, А. Боровой, Б. Огородников. Лесной пожар как фактор перераспределения радионуклидов чернобыльского генезиса в окружающей среде. *Радиохимия* 46 (1), 93-96 (2004).
- [61] Н. Веремей, Ю. Довгалюк, Е. Станкова. Численное моделирование конвективных облаков, развивающихся в атмосфере при чрезвычайных ситуациях (взрыв, пожар). *Физика атмосферы и океана* 43 (6), 792-806 (2007).
- [62] H. Winkler, P. Formenti, D. Esterhuyse, R. Swap, G. Helas, H. Annegarn, M. Andreae. Evidence for large-scale transport of biomass burning aerosols from sunphotometry at a remote South African site. *Atmospheric Environment* 42 (22), 5569-5578 (2008).
- [63] G. Lujanienė, V. Lujanas, V. Remeikis, A. Plukis, D. Jankūnaitė, B. Ogorodnikov. Speciation of radionuclides, their transformation and migration peculiarities in the environment. *Environmental and Chemical Physics* 21 (3-4), 36-45 (1999).
- [64] G. Lujanienė, V. Aninkevičius, V. Lujanas. Artificial radionuclides in the atmosphere over Lithuania. *Journal of Environmental Radioactivity* 100, 108-119 (2009).
- [65] G. Lujanienė, V. Lujanas, A. Mikeliūskienė. Forest fires as possible mechanism of redistribution of radioactive contamination. *Sveikatos mokslai* 3, 11-16 (2003).
- [66] J. Tschiersch, P. Frank, P. Roth, F. Wagenpfeil, J. Watterson. Enhanced airborne radioactivity during a pine pollen release episode *Radiation and Environmental Biophysics* 38 (2), 139-145 (1999).
- [67] G. Wotawa, M. Kalinowski. Evaluation of the operational IDC ATM products by comparing HYSPLIT BA, FA and OMEGA FOR during Level 4 events in Scandinavia. *Proceedings of the Informal Workshop on Meteorological Modelling in Support of CTBT Verification*. December 2000.12.4-6, Vienna. (2000).
- [68] А. Кононович, Н. Верховецкий, В. Пешков, С. Безменов. Влияние негерметичности ТВЭЛов на уровень загрязнения радионуклидами

- технологических сред. Атомные электрические станции 10, 263-272 (1989).
- [69] Г. Дорошенко, А. Мигулин, С. Панченко. Модель формирования активности газовых продуктов деления в технологических средах АЭС с ядерным реактором РБМК-1000. Атомные электрические станции 11, 78-82 (1989).
- [70] В. Бадяев, Ю. Егоров, Е. Иванов, С. Казаков, А. Носков. Применение системного анализа в задачах радиационной безопасности АЭС. Радиационная безопасность и защита АЭС 11, 13-23 (1986).
- [71] P. Poškas, R. Zujus, A. Brazauskaitė, J. Kolesnikovas, G. Būdvytis. Ignalinos AE 1-ojo bloko priverstinės cirkuliacijos kontūro radiologinis įvertinimas. Energetika 4, 8-13 (2003).
- [72] K. Almenas, A. Kaliatka, E. Ušpuras. Ignalina RBMK-1500: A Source Book. Kaunas: Lithuanian Energy Institute. <http://www.lei.lt/insc/sourcebook/> (1998).
- [73] В. Петухов. Функционирование АЭС (на примере РБМК-1000). Справочник <http://www.reactors.narod.ru/rbmk/index.htm> (2008).
- [74] Техническое описание газовоздушных выбросов в атмосферу. ПТОэд-0517-4В1, 193 р. (2000).
- [75] Игналинская АЭС. Схема очистки газовых сбросов, Сх-164. ПТОэд-0921-60В10.
- [76] Ю. Егоров, А. Носков. Радиационная безопасность на АЭС. Библиотека эксплуатационника АЭС. Москва: Энергоатомиздат, 153 р. (1986).
- [77] В. Крицкий, Н. Ампелогова, Е. Евстигнеева, В. Крупенникова, Л. Кудряшов, М. Шведова, В. Лебедев, Ю. Гарусов, Е. Козлов, С. Ковалев. Анализ эффективности иодных угольных адсорберов в системах спецвентиляции АЭС с РБМК-1000. Атомная энергия 83 (1), 44-49 (1997).
- [78] P. Aleksandrov, V. Kalechits, E. Khozyasheva, P. Chechuev. Detecting small leaks in pipes in nuclear power plants by measuring aerosol parameters Atomic Energy 97 (3), 189-195 (2004).
- [79] А. Силантьев, И. Шкуратова. Обнаружение промышленных загрязнений почвы и атмосферных выпадений на фоне глобального загрязнения. Ленинград: Гидрометеиздат, 136 р. (1983).
- [80] В. Бадяев, Ю. Егоров, С. Казаков. Охрана окружающей среды при эксплуатации АЭС. Библиотека эксплуатационника АЭС. Москва: Энергоатомиздат, 223 р. (1990).
- [81] Отчет по анализу безопасности 2 энергоблока ИАЭС. ПТОаб2-0345-102, 49 р. (2001).
- [82] Н. Гусев, М. Головкин, О. Шаповалов, Л. Хамьянов, В. Шмелев, М. Альтшулер. Выброс радиоактивных газов и аэрозолей серийными атомными станциями. Атомная энергия 74 (4), 360-364 (1993).
- [83] IAE regiono 2006 m. radiacinio monitoringo ataskaita. ПТОот-0545-14 (2007).
- [84] Radionuklidų išmetimo į aplinką iš branduolinės energetikos objektų ribojimas ir radionuklidų išmetimo leidimų išdavimo bei radiologinio monitoringo tvarka. LAND 42-2001 (Žin., 2001, Nr. 13-415) (2001).
- [85] Ignalinos AE naujasis kietųjų atliekų tvarkymo ir saugojimo kompleksas. Poveikio aplinkai vertinimo ataskaita. Nukem Technologies GmbH-Lietuvos energetikos institutas, 413 p. (2008).

- [86] Panaudoto RBMK branduolinio kuro iš Ignalinos AE 1 ir 2 blokų laikinas saugojimas. Poveikio aplinkai vertinimo ataskaita. GNS - Nukem Technologies GmbH - Lietuvos energetikos institutas, 378 p. (2006).
- [87] J. Fachinger. Inventory of reactor graphite and treatment for disposal. RADWAP 2008, 2008.10.27-31, Julich Forschungszentrum, 25 p. (2008).
- [88] Trumpaamžių labai mažo aktyvumo radioaktyviųjų atliekų kapinynas. Lietuvos energetikos institutas. 292 p. (2008).
- [89] European Commission Joint Research Centre. Institute of Environment and Sustainability. Ispra, Italy. <http://ies.jrc.ec.europa.eu/index.php?page=welcome-message> (2008).
- [90] K. Makhonko, V. Kim. Dynamics of air, soil and water contamination by technogenic radionuclides of the territory of the USSR and Russia in 1954-2000. 92 (5), 421-429 (2002).
- [91] К. Махонько, В. Ким, Ю. Катрич, А. Волокитин. Сравнительное поведение трития и ^{137}Cs в атмосфере. Атомная энергия 85 (4), 313-318 (1998).
- [92] E. Krajny, L. Osrodka, M. Wojtylak, B. Michalik, J. Skowronek. Correlation between the meteorological conditions and the concentration of radionuclides in the ground layer of atmospheric air. Nukleonika 46 (4), 189-194 (2001).
- [93] A. Ioannidou, C. Papastefanou. Precipitation scavenging of ^7Be and ^{137}Cs radionuclides in air. Journal of Environmental Radioactivity 85, 121-136 (2006).
- [94] H. Wershofen, D. Arnold, T. Steinkopff. Measurement of plutonium isotopes in ground-level air in Northern-Germany – history and recent results. Nukleonika 46 (4), 155-159 (2001).
- [95] Y. Igarashi, M. Otsuji-Hatori, K. Hirose. Recent deposition of ^{90}Sr and ^{137}Cs observed in Tsukuba. Journal of Environmental Radioactivity 31 (2), 157-169 (1996).
- [96] P. Rulik, I. Malatova, D. Drabova, M. Tomasek. Long Term Observation of ^{137}Cs , ^7Be , ^{210}Pb and ^{40}K in the Air Aerosol and ^{85}Kr in the Air in Prague, Czech Republic. Proceedings in 10th International Congress of the International Radiation Protection Association. May 14-19, 2000, Hiroshima. Presentation P-4a-233 (2000).
- [97] B. Svenningsson, H. Hansson, A. Wiedensohler, K. Noone, J. Ogren, A. Hallberg, R. Colvile. Hygroscopic growth of aerosol particles and its influence on nucleation scavenging in cloud: Experimental results from Kleiner Feldberg. Journal of Atmospheric Chemistry 19 (1-2), 129-152 (1994).
- [98] C. Sprengard-eichel, M. Krijmers, I. Schijtz. Soluble and insoluble fractions of urban, continental and marine aerosol. Journal of Aerosol Science 29, supplement 1, 175-176 (1998).
- [99] M. Kulmala, G. Mordas, T. Petäjä, T. Grönholm, P. Aalto, H. Vehkamäki, A. Hienola, E. Herrmanna, M. Sipilä, I. Riipinen, H. Manninen, K. Hämeria, F. Stratmanna, M. Bildec, P. Winkler, W. Birmili, P. Wagner. The condensation particle counter battery (CPCB): a new tool to investigate the activation properties of nanoparticles. Journal of Aerosol Science 38 (3), 289-304 (2006).
- [100] В. Луянас, Г. Захарова. Некоторые особенности применения космогенных радионуклидов в качестве трассеров вертикального

- движения воздушных масс. Примеси в атмосфере и их применение в качестве трассеров. *Физика атмосферы* 8, 7-11 (1983).
- [101] G. Lujanienė, B. Ogorodnikov, A. Budyka, V. Skitovich, V. Lujanas. An investigation of changes in radionuclide carrier properties. *Journal of Environmental Radioactivity* 35 (1), 71-90 (1997).
- [102] B. Lukšienė, R. Druteikienė. Study of plutonium migration and/or accumulation in soil under field and laboratory conditions. *Archives of industrial hygiene and toxicology* 57, 17-22 (2006).
- [103] H. Timonen, S. Saarikoski, M. Aurela, K. Saarnio, E. Hillamo. Water-soluble organic carbon in urban aerosol: concentrations, size distributions and contribution to particulate matter. *Boreal Environment Research* 13, 335-346 (2008).
- [104] I. Savickaitė, R. Jasiulionis, Gudelis. A. Investigation of water-soluble and insoluble fractions of technogenic radionuclides near the source. *Environmental and Chemical Physics* 21 (3-4), 46-47 (1999).
- [105] E. Swietlicki. Aerosol Particle Deposition in the Human Respiratory Tract. AIRPOLIFE PhD Course "Air Pollution and Health". 2006.03.11, Copenhagen, 78 p. (2006).
- [106] S. Varghese, S. Gangamma. Particle Deposition in Human Respiratory Tract: Effect of Water-Soluble Fraction. *Aerosol and Air Quality Research* 6 (4), 360-379 (2006).
- [107] J. Stather, E. Ansoborlo, A. Phillips. Long-term effects following intakes of radionuclides in particulate materials. *Radiation protection dosimetry* 92 (1-3), 201-207 (2000).
- [108] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. Vol. 1. Sources. Annex A: Dose assessment methodologies, 63 p. (2000).
- [109] E. Pechova. Application of PC-COSYMA code such a verification tool used in stage of NPP design 4-th COSYMA Users Group Meeting, 1997.09.22, Prague, 23 p. (1997).
- [110] IAE regiono 2005 m. radiacinio monitoringo ataskaita. ПТОот-0545-13 (2006).
- [111] В. Матуолис, В. Поцюс, В. Лапейка. Особенности электрических свойств фильтров, применяемых для изучения атмосферных аэрозолей. *Физика атмосферы* 10, 99-104 (1985).
- [112] Материал фильтрующий ФПП-15-1,5 ТУ 6-16-2813-84. ООО Геосорб. http://mtksorbent.ru/Categor1_id/15/Default.htm (2008).
- [113] Паспорт на фильтрующий материал ФПП-15-1,5. Esfilteho (2005).
- [114] Aplinkos elementų užterštumo radionuklidais matavimas - mėginių gama spektrinė analizė spektrometru, turinčiu puslaidininkinį detektorių. *LAND* 36-2000 (Žin., 2000, Nr. 101-3208; Žin., 2005, Nr. 59-2083) (2000).
- [115] Silena nuclear information processor user guide. Milan: Silena, 302 p. (1990).
- [116] Calibration and use of germanium spectrometers for the measurement of gamma-ray emission rates of radionuclides. American National Standard ANSI N42.14-1991. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 72 p. (1991).
- [117] Р. Алексеев, Ю. Коровин. Руководство по вычислению и обработке результатов количественного анализа. Москва: Атомиздат, 72 p. (1972).
- [118] M. Makarewicz. Estimation of the uncertainty components associated with the measurement of radionuclides in air filters using gamma-ray spectrometers.

- Accreditation and Quality Assurance: Journal for Quality, Comparability and Reliability in Chemical Measurement 10 (6), 269-276 (2005).
- [119] R. Draxler, G. Hess. An overview of the HYSPLIT4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition. Australian Meteorology Magazine 47 (<http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>), 295-308 (1998).
- [120] D. Perkauskas. Evaluation of possible short-term air pollution transport from the Ignalina Nuclear Power Plant. Environmental and Chemical Physics 21 (3-4), 83-88 (1999).
- [121] E. Swanberg, S. Hoffert. Using atmospheric ^{137}Cs measurements and HYSPLIT to confirm Chernobyl as a source of ^{137}Cs in Europe. 23rd seismic research review: worldwide monitoring of nuclear explosions 2001.10.2-5, Jackson Hole, USA, 64-70 (2001).
- [122] D. Robbins, J. Rynes, M. Eisenbrey. Radionuclide detection threshold in the Lop Nor region. Proceedings of the 24th Seismic Research Review. Nuclear Explosion Monitoring: Innovation and Integration. 2002.09.17-19, Florida, USA, 721-730 (2002).
- [123] G. Lammela, E. Brüggemann, T. Gnauk, K. Müller, C. Neuss, A. Rohrla. A new method to study aerosol source contributions along the tracks of air parcels and its application to the near-ground level aerosol chemical composition in central Europe. Aerosol Science 34, 1-25 (2003).
- [124] A. Kulan. Seasonal ^7Be and ^{137}Cs activities in surface air before and after the Chernobyl event. Journal of Environmental Radioactivity 90 (2), 140-150 (2006).
- [125] С. Бесчастнов. Влияние сдвигов ветра на поперечное рассеяние струи газоаэрозольной примеси на больших расстояниях от источника. Метеорология и гидрология 12, 39-45 (2003).
- [126] А. Курбацкий, Л. Курбацкая. Моделирование дисперсии пассивной примеси от непрерывного источника над городским островом тепла. Метеорология и гидрология 11, 5-15 (2003).
- [127] Р. Бригевич, Р. Кузнецов. Экстракционное отделение радиоактивного марганца от больших количеств железа. Радиохимия 10 (2), 243-246 (1968).
- [128] А. Новиков, Т. Закревская, Л. Веселаго. Разделение редкоземельных элементов и гафния соосаждением с гидроокисью железа. Радиохимия 10 (4), 485-493 (1968).
- [129] А. Новиков, Е. Щекотурова, Т. Закревская. Разделение и концентрирование ^{91}Y , ^{95}Zr , ^{95}Nb и ^{99}Mo соосаждением с гидратированными окислами железа (III) и марганца (IV). Радиохимия 13 (5), 728-733 (1971).
- [130] В. Плотников, Т. Таураева. Адсорбция цезия-137 гидроксидами металлов. Радиохимия 17 (3), 338-344 (1975).
- [131] В. Кузнецов, В. Генералова. Исследование сорбционных свойств гидроксидов железа, марганца, титана, алюминия и кремния по отношению к ^{90}Sr и ^{137}Cs . Радиохимия 42 (2), 154-157 (2000).
- [132] Р. Ясюленис, И. Савицкайте. Некоторые результаты изучения концентраций радионуклидов в воздухе и выпадениях в районе Игналинской АЭС после аварии на Чернобыльской АЭС. Физика атмосферы 14 (24-27) (1989).

- [133] Р. Ясюленис, И. Савицкайте, А. Гудялис. Изучение содержания радионуклидов в выпадениях в районе Игналинской АЭС. Физика атмосферы 15, 73-79 (1991).
- [134] L. Salickaite-Bunikiene, A. Bunikis. Bendrosios gelezies koncentracijos nustatymas su 1,10-fenantrolinu. Hidrochemijos praktikumas. Vilnius: VU leidykla, 150-154 (2006).
- [135] R. Jasiulionis, A. Gudelis, I. Savickaitė, D. Marčiulionienė. Radionuclides in the lake Drūkšiai-the cooling pond basin of the Ignalina NPP. Atmospheric Physics 17 (1), 25-29 (1995).
- [136] <http://www.leaching.net/leaching/process/>.
- [137] T. Kyotani, M. Iwatsuki. Determination of water and acid soluble components in atmospheric dust by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, ion chromatography and ion-selective method. Analytical Sciences 14, 741-748 (1998).
- [138] R. Cornelis, J. Caruso, H. Crews, K. Heumann. Handbook of Elemental Speciation - Techniques and Methodology. John Wiley and Sons, 670 p. (2003).
- [139] A. Tessier, P. Campbell, M. Bisson. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace materials. Analytical chemistry 51 (7), 844-850 (1979).
- [140] Privatus pranešimas R. Jasiulioniui (1989).
- [141] S. Rasool. Chemistry of the lower atmosphere, New York-London: Plenum press, 335 p. (1973).
- [142] Р. Кренявичюс, Р. Ясюленис. Изучение вертикальной турбулентной диффузии в районе Игналинской АЭС с использованием космогенного ⁷Be. Атмосфера физики 12, 86-93 (1988).
- [143] Е. Берлянд. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 448 p. (1975).