

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Cheminės fizikos institutas

Aistis Jurkonis
POTENCIALAUS ATOMINIŲ ELEKTRINIŲ KELIAMO RADIOLOGINIO PAVOJAUS
LIETUVAI VERTINIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Aplinkos ir cheminės fizikos studijų programa

Studentas	Aistis Jurkonis
Leista ginti	2019-05-28
Darbo vadovas	dr. Evaldas Maceika
Recenzentas	dr. Arūnas Maršalka
Cheminės fizikos instituto direktorius	prof. Valdas Šablinskas

Vilnius 2019

Turinys

ĮVADAS.....	4
1. LITERATŪROS APŽVALGA	5
1.1. Tikimybinio AE avarijų pasekmių vertinimo apžvalga	5
1.2. „Taršos šaltinio“ apibrėžimas sunkioms avarijoms	5
1.3. Svarbiausi išmetimai saugos vertinimui	6
1.4. Tarptautinės atominės energetikos agentūros siūlomos apsauginės avarinės zonos	7
1.5. Modelių, skirtų skaičiuoti radionuklidų sklaidą atmosferoje, apžvalga	9
1.5.1. DREAM modelis.....	9
1.5.2. SORAMI modelis.....	10
1.5.3. AERMOD modelis.....	11
1.6. Dispersija atmosferoje	12
1.7. Atmosferos stabilumas.....	17
1.7.1. Vėjo greitis 10 m aukštyje (U_{10}) ir saulės spindulių stiprumas arba debesų kiekis.....	18
1.7.2. Vėjo krypties pokyčio standartinis nuokrypis	19
1.7.3. Temperatūros gradiento metodas	19
1.7.4. Richardsono skaičiaus metodas.....	20
1.7.5. Tūrinio Richardsono skaičiaus (Ri_B) metodas.....	20
1.7.6. Monin Obukhov ilgio metodas.....	21
1.7.7. Vėjo greičio santykio metodas	22
1.8. Sausojo nusėdimo (proceso) modeliai	22
1.8.1. Dalelių sausasis nusėdimas	23
1.8.2. Pirmasis metodas.....	23
1.8.3. Antrasis metodas	25
1.9. Drėgnojo nusėdimo (proceso) modeliai.....	26
1.9.1. Dalelių drėgnasis nusėdimas	26
1.9.2. Dujinis drėgnojo nusėdimo srautas	27
1.9.3. Debesies išsivalymas.....	29
2. TYRIMO METODIKA	31
2.1. Pasekmių tikimybinis vertinimas.....	31
2.2. Šaltinio įvertinimo programa PC COSYMA 2.0	31
2.3. Teršalų Gausinio pasiskirstymo šleife modelis.....	32
2.4. Modeliuojamo atvejo parametrų aprašymas.....	34

2.5. Kontroliniai dirvožemio ėminiai	37
2.5.1. Bandinių ėmimas.....	38
3.1. Kontrolinių bandinių matavimo rezultatai	40
3.2. Rezultatai Astravo ir Kaliningrado atominių elektrinių sunkiųjų avarijų atveju.....	41
3.3. Tikimybė gauti apšvitą Vilniaus miesto gyventojams.....	50
3.4. Žmonių tankis aplink Astravo AE.....	51
3.5. Tikėtinas iškritų tankis.....	52
Santrauka	54
Summary	55
Literatūra.....	56

IVADAS

Branduolinė energija yra viena pigiausių, tačiau katastrofos branduoliniuose objektuose yra vienos skaudžiausių. Kartu su gaunama nauda turime susitaikyti ir su tuo, kad galimų katastrofų atvejais gali būti patiriama žala.

Siekiant numatyti esamų ir galimų katastrofų padarinių žalą aplinkai, dažnai naudojamas kompiuterinis modeliavimas, kuris šiais laikais pasižymi labai plačiomis galimybėmis. Kadangi rytuose, netoli Lietuvos sienos, ir vos 50 km nuo Vilniaus miesto yra statoma Astravo atominė elektrinė (toliau – AE), o pietvakariuose, 10 km nuo Lietuvos sienos, buvo pradėta ir kada nors gali būti pastatyta Kaliningrado atominė elektrinė, galimų branduolinių avarių grėsmė tampa reali. Dėl aplink Lietuvą atsirandančių atominių elektrinių yra aktualu įvertinti jų keliamą pavojų ir jį pagrįsti, apskaičiuojant galimą apšvitą Lietuvos gyventojams. Šiame darbe naudojant PC Cosyma programą ir realius meteorologinius duomenis yra modeliuojamos sunkiosios hipotetinės Astravo ir Kaliningrado atominių elektrinių avarių pasekmės ir įvertinami padariniai Lietuvos Respublikos teritorijai ir Vilniaus miesto gyventojams.

Šio darbo tikslas yra įvertinti aplink Lietuvą statomų atominių elektrinių keliamą radiologinį pavojų.

Uždaviniai:

1. Surinkti, susisteminti ir apdoroti meteorologinius duomenis.
2. Sumodeliuoti 74-ias hipotetines Astravo ir Kaliningrado atominių elektrinių sunkiųjų avarių pasekmes, naudojant trijų metų (2015 m., 2016 m., 2017 m.) meteorologinius duomenis.
3. Įvertinti tikimybes Vilniaus miesto gyventojams patirti apšvitą Astravo atominės elektrinės avarijos atveju.
4. Paimti kontrolinius dirvožemio bandinius ir nustatyti dabartinį paviršinį užterštumą ^{137}Cs radionuklidu Lietuvoje.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

Šiame skyriuje aprašomi bendri sunkiųjų AE avarių pasekmių vertinimo aspektai. Pateikiami autoritetinių institucijų (tokių kaip: TATENA, NRC ir kt.) numatyti galimi radionuklidų avarinių išmetimų į atmosferą mastai ir jų sklaidos modeliavimo principai.

Apžvelgiamas tikimybinis atominių elektrinių avarių pasekmių vertinimas, aprašoma taršos šaltinio sąvoka ir aptariami svarbiausi radionuklidų išmetimai atominės elektrinės saugos įvertinimui. Ketvirtame ir penktame poskyriuose supažindinama su Tarptautinės atominės energetikos agentūros siūlomomis apsauginėmis avarinėmis zonomis apžvelgiami populiarūs DREAM ir SORAMI modeliai, skirti modeliuoti radionuklidų sklaidimą atmosferoje. Šeštame poskyryje pateikiami svarbiausi dispersijos atmosferoje skaičiavimo ir modeliavimo principai. Taip pat nemažas dėmesys skirtas atmosferos stabilumo nustatymo metodams bei radionuklidų pašalinimui iš atmosferos sausuoju ir drėgnuoju būdu – tai aprašoma septintajame, aštuntajame ir devintame poskyriuose.

1.1. Tikimybinio AE avarių pasekmių vertinimo apžvalga

Tikimybinė analizė – tai būdas įvertinti avarijos padarinius, kurie priklauso nuo daugelio veiksnių. Yra naudojami du būdai, norint suskaičiuoti tikimybinį laike integruotos teršalų koncentracijos ore pasiskirstymą. Pirmasis būdas remiasi sklaidos atmosferoje modeliavimo rezultatais ir susideda iš periodiškai kiekvieną dieną vykstančių diskrečių išmetimų sumos. Sumavimai atliekami tam periodui, kuris domina, pvz., savaitė, mėnuo ar metai. Šis tikimybinis pasiskirstymas yra vadinamas suminiu, nes dozės yra integruojamos per tam tikrą pasirinktą periodą ir parodo labiausiai tikėtiną radionuklidų pasiskirstymą geografinėje erdvėje [1].

Antrasis būdas nuo pirmojo skiriasi tuo, kad yra apskaičiuojamas pasirinkto laikotarpio meteorologinių duomenų aritmetinis vidurkis dar prieš atliekant radionuklidų sklaidos modeliavimą, taip gaunamas vienas duomenų paketas, su kuriuo ir atliekami skaičiavimai. Toks pasiskirstymas vadinamas vidutiniu pasiskirstymu. Jis atitinkamai rodo radionuklidų vidutinį tikimybinį pasiskirstymą radionuklidų, išmetimams vykstant vieną kartą dienoje, kuris reprezentuoja visą pasirinktą periodą [1].

1.2. „Taršos šaltinio“ apibrėžimas sunkioms avarijoms

1962 m. JAV Atominės energetikos komisija publikavo techninės informacijos dokumentą, kuriame pirmą kartą buvo paminėtas apibrėžimas „taršos šaltinis“ (angl. Source term) [2]. Jis tiek

kokybiškai tiek ir kiekybiškai apibūdina išmetamų radionuklidų kiekį į aplinką tipinės sunkiosios AE avarijos atveju. Žemiau aprašytos į aplinką išmetamų radionuklidų grupės ir jų procentinis pasiskirstymas sunkiosios avarijos atveju:

- Į aplinką patenka 100% reaktoriuje buvusių inertinių dujų.
- 50% reaktoriuje buvusių jodo izotopų (iš kurių 50% iškart po avarijos nusėda ant įvairių paviršių apsauginio gaubto viduje, taigi į aplinką išmetama apie 25% bendro reaktoriuje esančio jodo kiekio).
- 1% reaktoriuje esančių nelakių (kietųjų) skilimo produktų (dažniausiai tai yra nereikšmingas kiekis tolimesniems skaičiavimams) [2].

Didžioji dalis jodo (91 %) yra elementinėje formoje (I_2), 5 % yra prikibę prie dalelių ar aerosolių pavidale ir 4 % yra organiniai jodas junginiai (metilojodidas ir panašūs junginiai) [2].

1.3. Svarbiausi išmetimai saugos vertinimui

Ankstyvam padarinių įvertinimui didžiausią įtaką daro dujiniai produktai. Kieti ir skysti radionuklidai yra mažiau svarbūs įvertinant, koks bus bendras teršalų išmetimas į aplinką ankstyvojoje avarijos fazėje. Taip yra dėl to, kad dujų ir aerosolių sklidimo pro apsauginius barjerus greitis yra didžiausias ir jie greičiausiai gali padaryti žalą už apsauginio gaubto ribų. Norint nustatyti avarijos mastą, pirmiausia reikia įvertinti tris pagrindinius efektus, kurie sukelia didžiausią apšvitą. Pirmasis jų – tiesioginė apšvita nuo inertinių dujų (^{133}Xe , ^{85}Kr). Šios dujos praktiškai visuomet sudaro didelę dalį avarijų metu išmetamų teršalų. Antras labai svarbus faktorius yra inhaliacinė (įkvėptoji) dozė, gaunama nuo ^{131}I . Ir trečiasis faktorius yra apšvita nuo ant įvairių paviršių nusėdusio ^{137}Cs (ši dedamoji tampa itin svarbi vertinant apšvitos dozę bent savaitės ar dar ilgesniems periodams). Žemiau pateikiamos pagrindinės fizikinės – cheminės savybės, į kurias būtina atsižvelgti vertinant pasekmes po branduolinių elektrinių avarijų [2].

- Pusėjimo trukmė. Elektrinės veikimo metu susidaro daug ^{133}Xe , kurio pusėjimo trukmė yra 5,25 dienos. Dėl šio skilimo produkto gaunama didžiausia apšvita pirmomis dienomis po avarijos patekus į radioaktyvųjį debesį. ^{85}Kr taip pat yra inertinės dujos, kurių pusėjimo trukmė yra apie 11 metų. Dėl savo inertiškumo ir didelės dispersijos jis greitai pasklinda atmosferoje. Tokiu būdu prasiskiedžia ir tūrinis jo aktyvumas greitai sumažėja iki nekontroliuojamo lygio. Šio radionuklido pasišalinimas iš atmosferos yra labai lėtas, kadangi tai inertinės dujos, jos praktiškai nepasišalina iš atmosferos nusėdimo būdu ir dėl ilgos pusėjimo trukmės išlieka atmosferoje ilgai, nors ir mažo aktyvumo. Dar vienas radionuklidas, turintis santykinai ilgą pusėjimo trukmę – tai ^{137}Cs . Jo pusėjimo trukmė yra apie 30 metų. Šis radionuklidas lengvai nusėda ant žemės ir kitų paviršių iš atmosferos. Dar

labiau nusėdimą gali paspartinti lietus. Dėl šių savybių žmonių gaunama apšvita nuo iškritų ant žemės yra būtent dėl šio radiocezio izotopo. Ir jis sudaro didelę dalį gaunamos ilgalaikės dozės dėl savo ilgaaamžiškumo. Nėgana to, praėjus daugeliui metų po Černobylio atominės elektrinės avarijos, matavimai parodė, kad praktiškai visas nusėdęs cezis yra susikaupęs viršutiniuose dirvožemio sluoksniuose su labai maža migracija gilyn, nors buvo tikėtasi priešingai.

- Radionuklidų lakumas. Šiuo požiūriu ksenonas, kriptonas, jodas ir tritis turėtų būti priskirti lakiems radionuklidams. Stroncis pagal lakumą yra tarpinis tarp lakių ir nelakių radionuklidų.
- Pašalinimas iš aplinkos dėl lietaus (natūralaus ar dirbtinio). Jodas, išskyrus jodą organiniuose junginiuose (kuris paprastai sudaro nuo 0,01 % iki 40 % bendro jodo kiekio ore, priklausomai nuo aplinkos sąlygų), lengvai pasišalina iš atmosferos, kaip ir cezis [2].

Avarijos atveju radioaktyvūs elementai nors ir lėtai, tačiau gali prasiskverbti pro silpniausias apsauginio gaubto dalis, tokias, kaip liukai personalui bei įrangai, elektros instaliacijos, valdymo bei vandentiekio įvadai, angos vamzdynams. Šios ertmės turi būti sujungtos su ventiliacijos šachtomis, kurios veda į aukštą (bent 80 – 100 m aukščio) kamina, kad, avarijos atveju, visi pro šias technologines ertmes apsauginiame gaubte prasiskverbę radionuklidai į aplinką būtų išmetami dideliame aukštyje, o ne prie žemės paviršiaus [2].

1.4. Tarptautinės atominės energetikos agentūros siūlomos apsauginės avarinės zonos.

Už atominės elektrinės aikštelės ribų rekomenduojama apsibrėžti keturias avarines zonas. Jas apibrėžti reikėtų dar tik pradėdant ruošti elektrinės statyboms. Šios zonos kartu nusako ir žmonėms kylančią riziką šiose teritorijose. Išskiriamos tokios zonos [3]:

- Prevencinių apsaugos priemonių zona;
- Skubių apsaugos priemonių zona;
- Ilgalaikių apsaugos priemonių zona;
- Apsaugos priemonių planavimo zona.

Avarinės zonos ir joms būdingos atstumų ribos pateiktos 1 lentelėje. Šių zonų ribos nustatomos konkrečiai atsižvelgiant į kiekvienos elektrinės ypatybes. Priimant šiuos atstumus turi būti atsižvelgta į geografinę padėtį, elektrinės galingumą, urbanizaciją teritorijoje, galimus avarijos scenarijus ir vietos sąlygas [3].

1 lentelė. Apsaugos zonos ir Tarptautinės atominės energetikos agentūros siūlomos jų atstumų ribos [3].

Apsaugos zonos ir siūlomi jų atstumai	Siūlomas zonos ribos (spindulys) nuo atominės elektrinės.
Preveninių apsaugos priemonių zona	Nuo 3 km iki 5 km
Skubių apsaugos priemonių zona	Nuo 15 km iki 30 km
Ilgalaikių apsaugos priemonių zona	Nuo 50 km-100 km
Apsaugos priemonių planavimo zona	Nuo 100 km-300 km

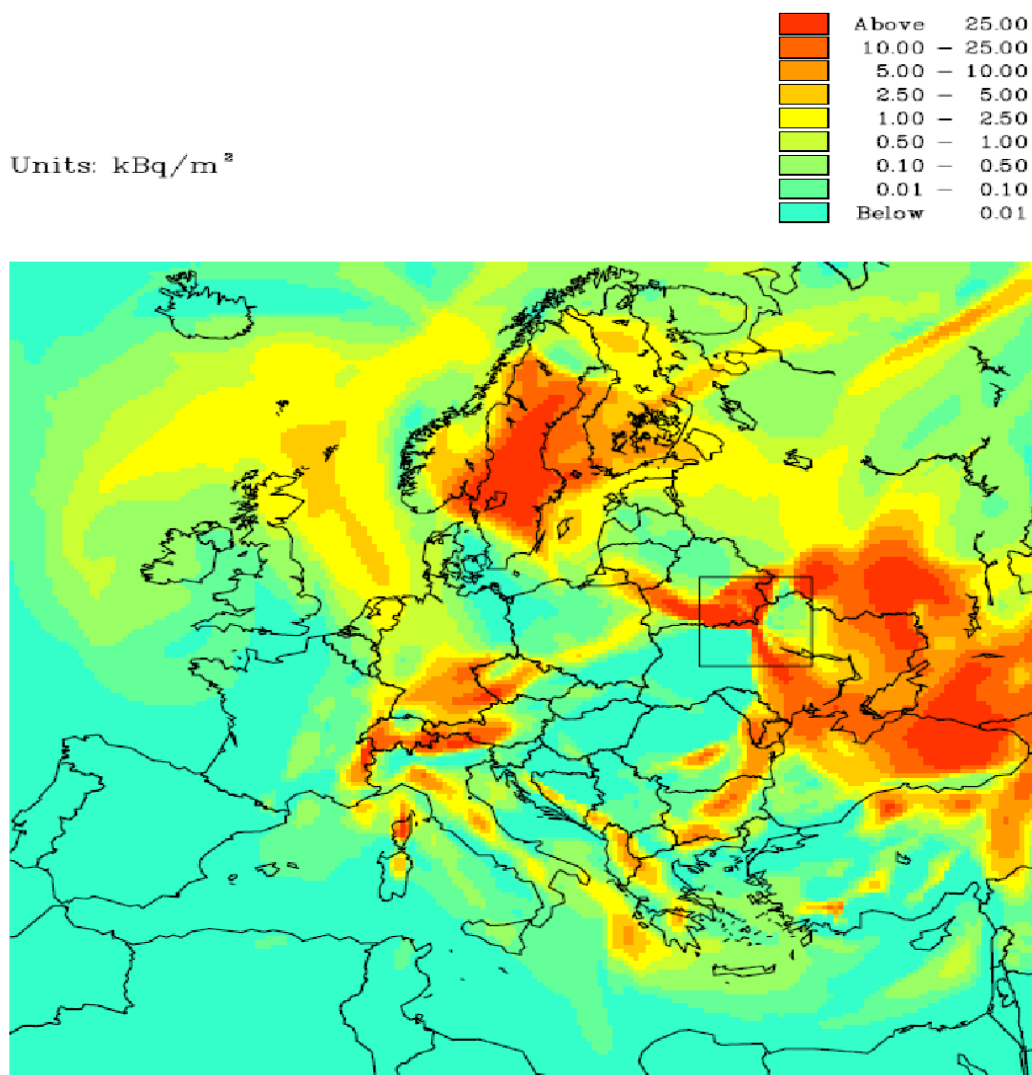
- **Preveninių apsaugos priemonių zona.** Tai teritorija už sanitarinės zonos ribų aplink atominę elektrinę, kurioje yra iš anksto suplanuotos skubios apsaugos priemonės. Paskelbus avarijos signalą, skubios apsaugos priemonės vykdomos nedelsiant. Šių priemonių tikslas – sumažinti nulemtųjų jonizuojančios spinduliuotės poveikio efektų riziką iki minimumo dar iki radionuklidų išsiveržimo į aplinką. Zonos riba turi būti nustatyta taip, kad evakuacija šioje zonoje būtų įgyvendinta per optimaliai trumpą laiką. Jei reikia evakuoti ir skubių apsaugos priemonių zoną, tuomet preveninių apsaugos priemonių zonos evakavimas turi pirmumo teisę. Taip pat turi būti imtasi atsarginių priemonių apsaugant tokius visuomeninius objektus, kurie negali būti greitai evakuojami. Tai – ligoninės, slaugos namai, kalėjimai [3].
- **Skubių apsaugos priemonių zona.** Tai aplink atominę elektrinę nustatyta zona, kurioje yra iš anksto parengtas pasirengimo avarijoms planas ir, atsižvelgiant į aplinkos užterštumo lygį, pasirengta vykdyti skubias radiacinės apsaugos priemones. Šių priemonių tikslas – sumažinti nulemtųjų jonizuojančios spinduliuotės poveikio efektų riziką iki minimumo dar iki, arba labai greitai po, radionuklidų išsiveržimo į aplinką [3].
- **Ilgalaikių apsaugos priemonių zona.** Šioje teritorijoje iš anksto ruošiamasi veiksmingai įgyvendinti apsaugos priemones nuo ilgalaikių apšvitos dozių, esant radioaktyviajam vietovės ir maisto užterštumui. Turi būti paruoštos instrukcijos, kaip sumažinti įkvėptąsias (inhaliacines) dozes [3].
- **Apsaugos priemonių planavimo zona.** Šioje zonoje, jei būtina, turi būti imtasi šių priemonių: galvijų pašaras turi būti apsaugotas (pvz., uždengtas), apsaugotas geriamasis vanduo, kurio pagrindą sudaro lietaus vanduo, taip pat apribotas vietoje išgaunamų produktų vartojimas, tokių, kaip grybai, medžiojamieji paukščiai ir žvėrys, galvijų pienas, lietaus vanduo galvijų girdymui, bei sustabdyta prekyba šiais produktais iki tol, kol bus patvirtintas tolimesnis veiksmų planas [3].

1.5. Modelių, skirtų skaičiuoti radionuklidų sklaidą atmosferoje, apžvalga

1.5.1. DREAM modelis

DREAM (angl. the Danish Rimpuff and Eulerian Accidental release Model) modelis buvo sukurtas skaičiuoti radioaktyvių teršalų pernašą, dispersiją ir nusėdimą (sausą ir drėgną), įvykus branduolinių objektų avarijoms. Šis modelis yra kombinacija Lagranžo modelio, kuris apima dispersiją netoli nuo šaltinio, ir Eulerio modelio, kuris gerai aprašo pernašą dideliais atstumais.

Tradicinis Eulerio modelis generuoja "aštrius" gradientus, modeliuojant teršalų sklaidimą iš vieno stipraus šaltinio. Dėl "aštrių" gradientų atsiranda nepageidaujamos osciliacijos. Lagranžo modelis netiksliai modeliuoja pernašą dideliais atstumais. Tačiau kartu šie modeliai vienas kitą papildo. Lagranžo modelis naudojamas netoli nuo šaltinio skaičiuoti pernašą ir dispersiją, o Eulerio modelis naudojamas skaičiuoti pernašą dideliais atstumais. Šis modelis įskaito vėjo srovių pasikeitimus visoje modeliuojamoje plokštumoje. Vėjo kryptis ir greitis toli nuo išmetimo taško gali gerokai skirtis, tad šis modelis yra tikslesnis skaičiuojant teršalų sklaidimą dideliais atstumais. 1 pav. pateiktas ^{137}Cs iškritų tankio vertinimo žemėlapis po Černobylio AE avarijos naudojant DREAM modelį [4].



1 pav. ^{137}Cs iškritų tankio žemėlapis po Černobylio AE avarijos, įvertintas panaudojus DREAM modelį [4].

1.5.2. SORAMI modelis

SORAMI (angl. SENES Oak Ridge Atmospheric Dispersion Model for Iodine-131) – tai visus svarbiausius ^{131}I dispersijos atmosferoje procesus apimantis modelis, paremtas teršalų Gausiniu pasiskirstymu šleife. Sukurtas 1982 m. Oukridžo (JAV) laboratorijoje. Šio modelio atsiradimą lėmė naujos žinios apie drėgnąjį nusėdimą. Šis modelis naudoja meteorologinius duomenis iš vienos stoties, tad vėjo kryptis yra laikoma tokia pati visuose modeliuojamos gardelės taškuose, jis neįskaito oro srovių krypties ir greičio pasikeitimų. Sausas ir drėgnas nusėdimas yra pagrindiniai teršalų pasišalinimo iš debesies ir nusėdimo ant žemės paviršiaus procesai. Sausas ir šlapias nusėdimas tiesiogiai priklauso nuo ^{131}I cheminės formos. ^{131}I koncentracija pasirinktoje cheminėje formoje pavėjui yra apskaičiuojama naudojant modifikuotą Gauso modelį [5]:

$$C_{a,k} = \left[\sum_{j=1}^3 Q_{0,j} \left\{ \left(\frac{Q_j}{Q_{0,j}} \right)_0 \cdot \left(\frac{Q_k}{Q_{0,k}} \right)_x \right\} \right] \cdot \frac{Q_i}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\}, \quad (1)$$

čia:

$C_{a,k}$ – ^{131}I cheminėje formoje k koncentracija bet kuriame erdvės taške (Bq/m^3),

$Q_{0,j}$ – ^{131}I šaltinio galia, t. y., per vieną sekundę į atmosferą išmetamas šio radionuklido aktyvumas (Bq/s),

$(Q_j/Q_{0,j})$ – šaltinio nusilpimo korekcija (bedimensinis),

H – efektinis išmetimo aukštis (tai išmetimo šaltinio fizinio aukščio virš žemės paviršiaus suma su papildomu išmetamo srauto šiluminio pakėlimo aukščiu),

u – vidutinis vėjo greitis ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),

σ_y, σ_z – vidutiniai nuokrypiai, aprašantys radionuklidų normalųjį koncentracijos pasiskirstymą debesyje atitinkamos koordinatės kryptimi (m).

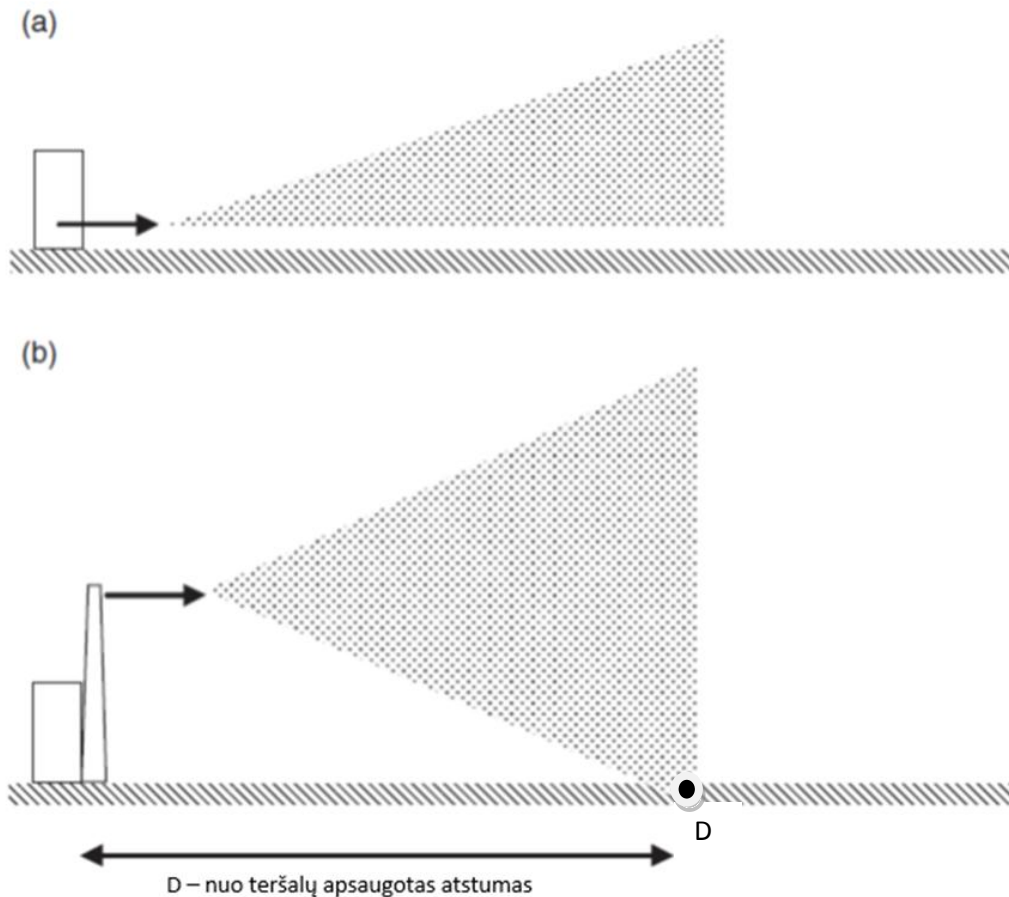
Reikia paminėti, kad šis modelis neįskaito cheminių transformacijų ir neatsižvelgia į radionuklidų skilimą. Dėl šių trūkumų toks modelis gali būti naudojamas tik radionuklidams, turintiems santykinai ilgą pusėjimo trukmę, tokią, kad per modeliavimo laiką būtų galima laikyti, jog radionuklido aktyvumas nekinta [5].

1.5.3. AERMOD modelis

AERMOD dispersijos modelis taip pat yra paremtas Gauso modeliu (ang. GMP – Gaussian Plume Model). Tai yra nuo laiko nepriklausantis dispersijos atmosferoje modelis. Šis modelis turi kelias pagalbines programas. AERMET programa naudodama meteorologinius duomenis ir vietovės šiurkštumo duomenis, apskaičiuoja atmosferos sluoksnių maišymosi aukštį, trintį tarp sluoksnių ir jų judėjimo greitį. AERMAP programa charakterizuoja teritoriją ir sukuria daviklių tinklą. AERMOD pranašumas yra tas, kad ši programa naudoja tris paketus meteorologinių duomenų. Pagrindiniai meteorologiniai duomenys naudojami iš aikštelėje esančios meteorologinės stoties, antras duomenų paketas yra imamas iš kitos artimiausios stoties ir naudojamas atsiradusių spragų užpildymui. Trečiasis duomenų paketas turi turėti meteorologinius duomenis išmatuotus aukštesniame taške nei pirmoje ir antroje stotyje. Taip sujungus trijų stočių duomenis ir informaciją apie vietovę gaunamas didelis skaičiavimo tikslumas [6].

1.6. Dispersija atmosferoje

Priklausomai nuo išmetimo aukščio skiriasi dispersijos atmosferoje ypatumai. Žemiau aprašyti šie skirtumai [7].



2 pav. Dispersija, vykstant išmetimui prie žemės paviršiaus (a). Dispersija vykstant išmetimui pre aukštą kaminą (b) [7].

Kaip pavaizduota 2 paveiksle (a), vykstant radionuklidų išmetimui į aplinką prie žemės paviršiaus, yra užteršiamas visas plotas nuo išmetimo taško pavėjui. Tuo tarpu vykstant išmetimui tam tikrame aukštyje 2 pav. (b), žemės paviršius atstumu D nuo išmetimo taško nėra užteršiamas radionuklidais. Žmonės, o tai dažniausiai yra elektrinės darbuotojai, esantys šioje teritorijoje, nepatiria išorinės apšvitos, o teritorija lieka neužteršta. Be to, antruoju atveju, taške D teršalų koncentracija yra mažesnė nei (a) atveju, dėl to, kad dispersija atmosferoje gali vykti visomis kryptimis [7].

Toliau išvardinti parametrai daro pačią didžiausią įtaką dispersijai atmosferoje [8]:

- Vėjo greitis.
- Vertikalus temperatūros gradientas (temperatūros keitimasis kintant aukščiui).

Vėjo greičio įtaka oro maišymuisi (turbulencijai) ir dispersijai yra savaime suprantama. Vertikalus temperatūrinis gradientas gali būti paaiškinas taip:

idealiu atveju, jei mažas oro tūris yra perkeliamas aukštyn iš 1 pozicijos į 2 poziciją (3 pav.) be šilumos mainų su aplinka (tokia prielaida galima dėl greito oro srovių judėjimo dėl turbulencijos), tuomet jo slėgis stengdamasis palaikyti pusiausvyrą su naująja aplinka turi mažėti (kylant į viršų atmosferos slėgis mažėja apie 9 mmHg kas 100 m). 3 pav. pateiktame pavyzdyje, sferinis oro tūris yra pakeliamas į 100 m aukštį, dėl to slėgio skirtumas yra labai akivaizdus.

Procesas kurio metu nevyksta šilumos mainai su aplinka termodinamikoje vadinamas adiabatinio procesu, temperatūrą T_2 (kelvinais) galime išreikšti [2]:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(k-1)}{k}}, \quad (2)$$

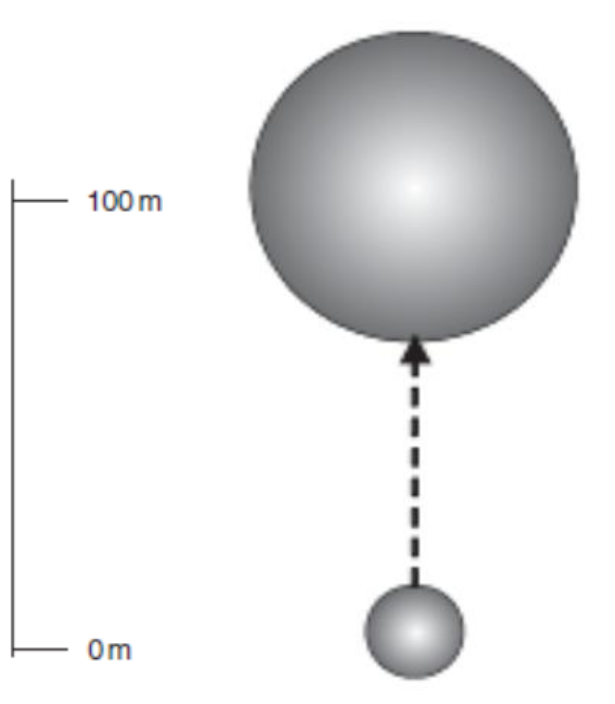
čia:

T_1, T_2 – temperatūra skirtinguose aukščiuose, h_1 ir h_2 atitinkamai – žemiau ir aukščiau.

P_1, P_2 – slėgis skirtinguose aukščiuose, h_1 ir h_2 atitinkamai – žemiau ir aukščiau.

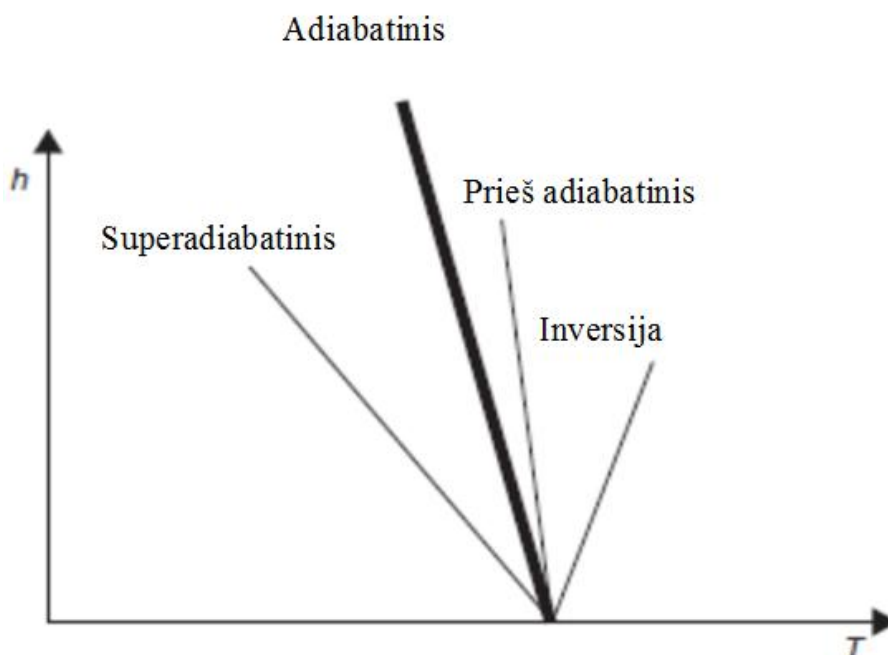
k – santykis tarp savitosios šilumos, esant pastoviam slėgiui, ir savitosios šilumos, esant pastoviam tūriui (oro atveju $k = 1,4$).

Jei oro temperatūra aukštyje 2 yra didesnė nei pradiniam aukštyje 1, tuomet mažas oro tūris atsidūręs aplinkoje 2 yra tankesnis ir sunkesnis, ir dėl gravitacijos jis yra linkęs grįžti į pradinę savo padėtį aukštyje 1. Sąlygos yra stabilios. Jei yra atvirkščiai, jis yra linkęs kilti dar labiau į viršų. Sąlygos nestabilios. Tokie patys procesai vykėtų, jei mažą oro tūrį perkeltumėm iš aukštesnės pozicijos į žemesnę [2].



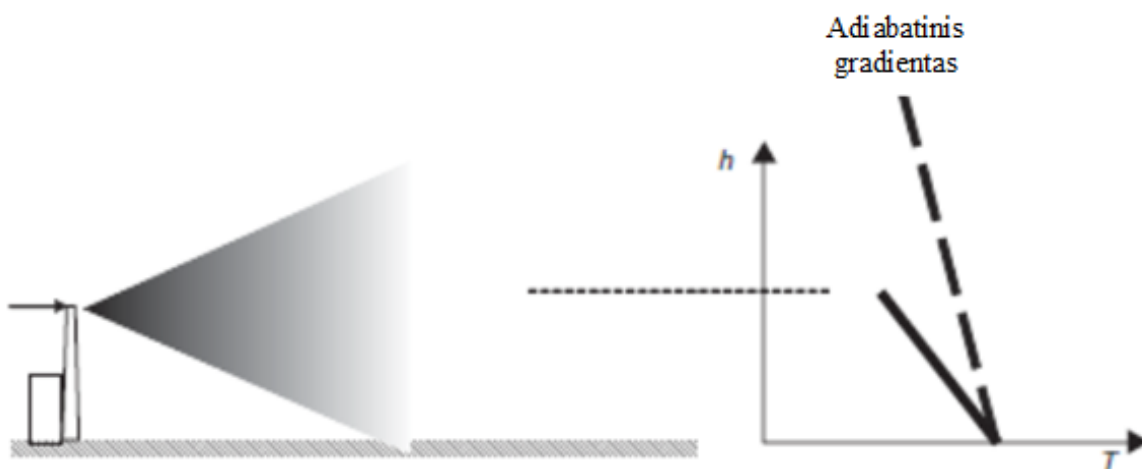
3 pav. Mažo oro tūrio pakēlīmas īs pirmos pozīcijas ī antrā pozīcijā [2].

Vertīkalus temperatūrinis oro gradientas vadīnamas superadiabatīnīu, jei īis yra mažesnis už adiabatīnī, īr vadīnamas priēšadiabatīnīu, jei yra dīdesnis už adiabatīnī. Superadiabatīnīu atvejū dīdējant aukščiui temperatūra mažēja greīčiau, nei adiabatīnīu atvejū, o priēšadiabatīnīu atvejū dīdējant aukščiui temperatūra mažēja lēčiau, nei adiabatīnīu atvejū (4 pav.) [2].

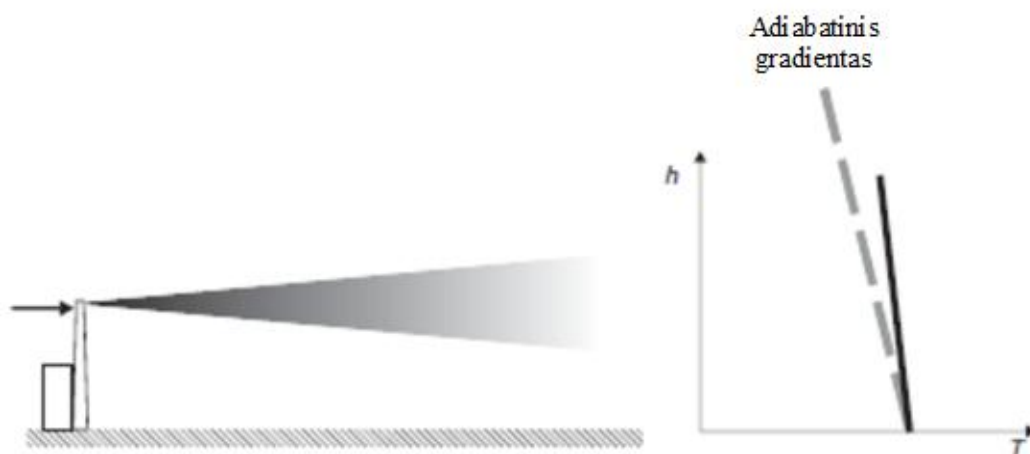


4 pav. Vertīkalaus temperatūros gradiento galīmī variantai [2].

Superadiabatinės sąlygos lemia atmosferos nestabilumą ir labai didelį turbulencinį judėjimą, dėl to ir dispersija šiomis sąlygomis yra pati efektyviausia (5 pav.). Priešadiabatinėmis sąlygomis yra atvirkščiai – atmosfera yra beveik stabili, o dispersija labai maža (6 pav.) [2].

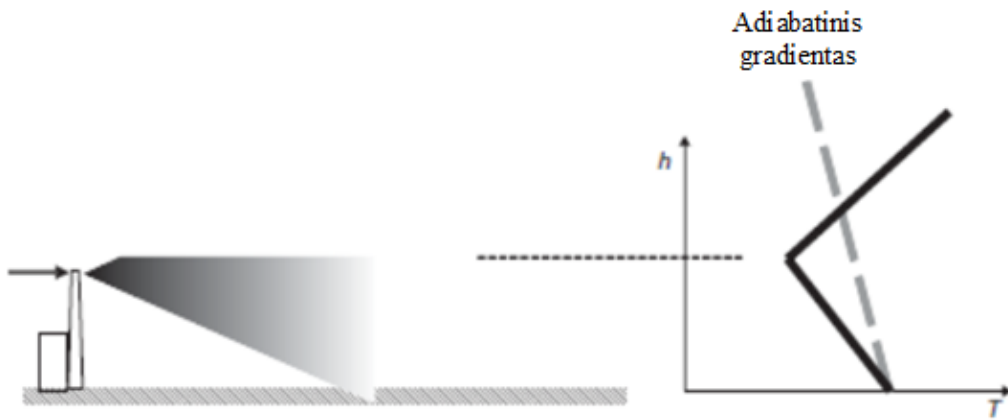


5 pav. Dispersija superadiabatinėmis sąlygomis [2].



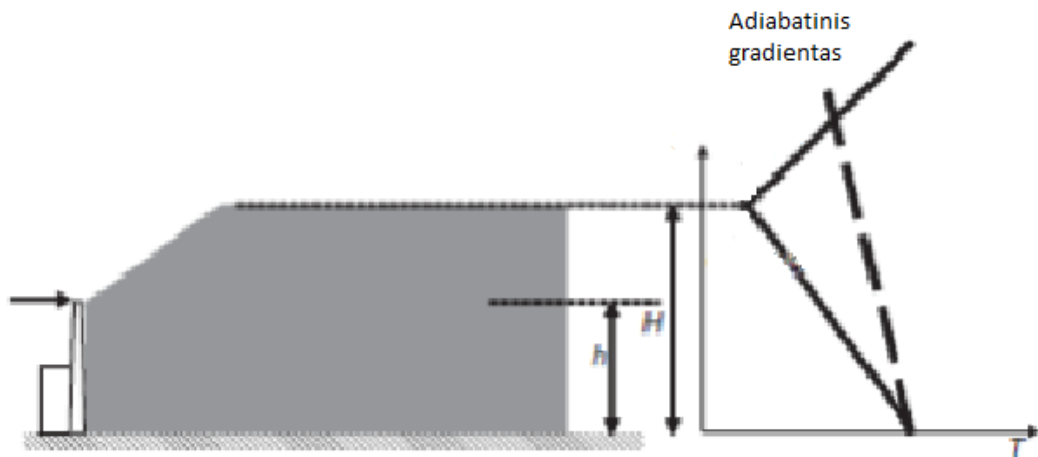
6 pav. Dispersija priešadiabatinėmis sąlygomis [2].

Įdomi priešadiabatinė situacija susidaro, kai temperatūra didėja didėjant aukščiui, tokia situacija vadinama temperatūros inversija (7 pav.). Dažniausiai tokia situacija susiklosto giedromis naktimis, kai įkaitusi žemė gali lengvai atiduoti šilumą atgal į kosmosą. Atmosferos sluoksniai arčiausiai žemės paviršiaus vėsta ir tampa santykinai vėsesni nei aukštesnieji atmosferos sluoksniai. Patekėjus saulei, spinduliai vėl įkaitina žemės paviršių ir inversija dingsta. Inversija atmosferos sluoksniuose įvyksta tik esant labai silpnam vėjo dvelkimui (vėjo greitis < 2 m/s) [2].



7 pav. Dispersija inversijos sąlygomis [2].

Kitas neįprastas reiškiny yra smilkimas (*angl. fumigation*), dažniausiai taip nutinka ryte, po giedros nakties, kurią buvo stebima inversija, ne daugiau kaip valanda po saulės patekėjimo. Saulei pradėjus kaitinti žemės paviršių, inversijos sluoksnis pakyla nuo žemės paviršiaus iki aukščio H . Jeigu žemiau inversijos sluoksnio susiklosto labai geros sąlygos vykti difuzijai (yra vėjas), tuomet visuomet, žemiau inversijos sluoksnio, išmetimo koncentracija yra linkusi būti pastovi, nepriklausomai nuo aukščio. Tai labai svarbu, jei išmetimas vyksta pro aukštą kaminą, nes šiuo atveju nebelieka „šešėlio“ efekto ir visa teritorija, net prie pat išmetimo taško, yra užteršiama (8 pav.). Paprastai tokios sąlygos netrunka ilgiau nei pora valandų [2]



8 pav. Dispersija smilkimo (*angl. fumigation*) sąlygomis [1].

Oro masių maišymosi parametrai netoli atominės elektrinės tam tikru momentu gali būti įvertinti žinant oro temperatūros priklausomybę nuo aukščio. Vietinė meteorologinė stotis, esanti prie atominės elektrinės, atlieka labai svarbų vaidmenį elektrinės veikimo metu. Atliekami matavimai, kurių tikslas yra nustatyti tinkamiausius momentus, kada į atmosferą gali būti

išleidžiamos dujinės medžiagos. Meteorologinis bokštas paprastai būna apie 100 m aukščio ir atlieka labai svarbų vaidmenį kaip atominės elektrinės struktūrinė dalis [1].

1.7. Atmosferos stabilumas

Atmosferos stabilumas apibrėžiamas, kaip atmosferos galėjimas paskatinti arba pasipriešinti atmosferiniam maišymosi judėjimui. Pastaraisiais dešimtmečiais buvo pasiūlyta daug atmosferos stabilumo klasifikacijos sistemų. Pagrindinės jų yra išvardintos žemiau [7], [9].

Atmosferos stabilumas dažnai minimas dispersijos tyrimuose, kaip pagrindinis parametras, apibrėžiantis atmosferos turbulencijos būseną arba apibūdinantis dispersijos galimybes atmosferoje. Dėl daugelio priežasčių turbulencijos sluoksnio riba nėra žinoma ir išeitis yra padaryti nesudėtingas atmosferos stabilumo kategorijas ir skirstyti į jas pagal atmosferos sąlygas bei atmosferos sluoksnių dispersines savybes. Populiariame Gauso modelyje yra naudojamos atmosferos stabilumo klasės, pagal jas nustatomas algoritmas, pagal kurį yra skaičiuojamos teršalų koncentracijos. Kitas parametras, kuris vaidina didelį vaidmenį atmosferos dispersijoje yra atmosferos inversijos sluoksnio aukštis [10]. Ši riba yra kaip gaubtas – aukščiau jos nepatenka teršalai iš atmosferos, o žemiau jos gali laisvai vykti oro srovių maišymasis (turbulenciniai reiškiniai). Taip pat yra modelių, kuriuose yra galimas srautas per šią ribą tik iš apačios, tačiau atsižvelgiama į pastaruoju metu atliktus tyrimus ir atmosferos sluoksnių klasifikavimo mechanizmus, kurie akcentuoja turbulencinio judėjimo svarbą ir pabrėžia, kad inversijos sluoksnis vykstant dispersijai veikia kaip veidrodis ir atspindi teršalus žemyn [11]. Išskiriamos šešios atmosferos stabilumo klasės: A – labai nestabili, aktyviai vyksta konvekcija, B – vidutiniškai nestabili, C – truputį nestabili, D – neutrali, E – pusiau stabili, F – visiškai stabili. Vėliau buvo pridėta septinta klasė G – atitinkanti nakties periodą ir vėjo nebuvimą [12]. Istoriskai tokią klasifikaciją pasiūlė Paskvilis (*Pasquill*) ir Gifordas (*Gifford*), vėliau patobulino Turneris (*Turner*) [2], [8], [13].

Daug schemų buvo sukurta nustatyti atmosferos stabilumo klasę naudojant skirtingus meteorologinius parametrus. Visos schemos priskiria atmosferos stabilumą vienai iš šešių ar septynių klasių, priklausomai nuo naudoto stebėjimo tipo ir gaunamų duomenų. Teisingos schemos pasirinkimas turi didelę įtaką Paskvilio klasės priskyrimui, nuo to priklauso, kokia stabilumo klasė bus priskirta vienu ar kitu atveju [14]. Dėl šio trūkumo 1980 m. – 1981 m. Jungtinėse Amerikos Valstijose, Ilinojuje esančioje Kincaido elektrinėje buvo atliekami meteorologiniai matavimai ir skirtingais būdais nustatomos Paskvilio klasės. Vertinamas kiekvieno metodo tikslumas [15].

2 lentelė. Modifikuotos Paskvilio stabilumo klasės [7].

Vėjo greitis (m/s)	Dienos metu apšviestumas (W/m ²)				Valanda prieš saulėlydį arba valanda po saulėtekio	Debesų kiekis nakties metu		
	Stiprus (> 600)	Vidutinis (300-600)	Silpnas (< 300)	Apsiniaukęs		0-3	4-7	> 8
≤ 2,0	A	A-B	B	C	D	F arba G	E	D
2,0-3,0	A-B	B	C	C	D	F	E	D
3,0-5,0	B	B-C	C	C	D	E	D	D
5,0-6,0	C	C-D	D	D	D	D	D	D
> 6,0	C	D	D	D	D	D	D	D

Stabilumo klasės aprašo atmosferos savybę skatinti (arba slopinti) oro masių judėjimą vertikaloje ašyje. Jei toks judėjimas yra skatinamas – turime nestabilias sąlygas (turbulencija didėja), jei toks oro masių judėjimas yra slopinamas – turime stabilias sąlygas (turbulencija slopinama), jeigu nevyksta nei skatinimas, nei slopinimas – turime neutralias atmosferos sąlygas. Keletas parametrų, tokių kaip Monin – Obukhov ilgis (L), temperatūros gradientas, tūrinis Richardson skaičius, vėjo krypties standartinis nuokrypis ir kiti, yra naudojami mikrometeorologijoje stabilumo klasės nustatymui. Skirtingos schemos gali būti naudojamos stabilumo klasės nustatymui [9]:

1. Vėjo greitis 10 m aukštyje (U_{10}) ir saulės spindulių stiprumas arba debesų kiekis.
2. Vėjo krypties pokyčio (horizontalioje ašyje) standartinis nuokrypis. Dar vadinamas σ_θ metodu.
3. Temperatūros gradiento metodas.
4. Richardson skaičiaus (Ri) gradiento metodas.
5. Tūrinio Richardson skaičiaus (Ri_B) metodas.
6. Monin – Obukhov ilgio ($M-O$) metodas.
7. Vėjo greičio santykio metodas.

Žemiau pateiktas detalesnis klasifikavimo metodų aprašymas, kurie yra naudojami stabilumo klasės nustatymui.

1.7.1. Vėjo greitis 10 m aukštyje (U_{10}) ir saulės spindulių stiprumas arba debesų kiekis

Šiam metodui yra reikalingi vėjo greičio matavimai 10 m aukštyje ir matavimai arba kitu būdu atliktas saulės spindulių intensyvumo įvertinimas dienos metu ir debesų kiekio įvertinimas

nakties metu. Stabilumo klasė nustatoma naudojant 2 lentelę. Joje yra pateikta modifikuota Paskvilio klasių sistema (modifikavo Davies ir Singh, 1985m.). Saulės spindulių stiprumas gali būti įvertintas naudojantis astronominiu sąryšiu [8]:

$$R_s = S_0 \cos Z_N (\tau - A_\omega) N \exp \left(-\frac{A_K}{\cos Z_N} \right), \quad (3)$$

čia:

S_0 – saulės intensyvumo konstanta,

Z_N – zenito kampas (saulės padėtis danguje),

τ – pralaidumo koeficientas švariame ore, įskaitant sklaidymą,

A_K – šviesos sugėrimas dėl vandens garų lašelių,

N – šviesos spindulių sugėrimas debesyse.

Zenito kampas gali būti apskaičiuojamas naudojantis formule [8]:

$$\cos Z_N = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \omega, \quad (4)$$

čia:

φ – platumos kampas,

δ – saulės deklinacijos kampas,

ω – valandinis kampas.

1.7.2. Vėjo krypties pokyčio standartinis nuokrypis

Šis metodas Paskvilio klasės nustatymui yra vienas iš dviejų rekomenduojamų Jungtinių Amerikos Valstijų branduolinių objektų reguliavimo komisijos (*angl. US Nuclear Regulatory Commission, USNRC*). Komisijos pateiktos vertės tarp vėjo krypties pokyčio standartinio nuokrypio ir Paskvilio atmosferos stabilumo klasių yra pateiktos 2 lentelėje [9].

1.7.3. Temperatūros gradiento metodas

Šiam metodui yra reikalingi temperatūros matavimai dviejuose aukščiuose. Apskaičiuojamas temperatūrų skirtumas tarp šių dviejų aukščių. Apatinės matavimo stoties rekomenduojamas aukštis yra 10 m, kad būtų išvengta įkaitusio žemės paviršiaus įtakos. Paprastai

šis skirtumas išreiškiamas ($^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$), tai yra temperatūros gradientas. Temperatūros gradiento ir Paskvilio klasių ribinės vertės yra pateiktos 3 lentelėje [7].

1.7.4. Richardsono skaičiaus metodas

Šiam metodui yra reikalingi temperatūros ir vėjo greičio matavimai dviejuose aukščiuose. Richardson skaičius apskaičiuojamas naudojant formulę [8]:

$$Ri = \frac{g\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta Z}\right)}{T\left(\frac{\Delta u}{\Delta Z}\right)^2}, \quad (5)$$

čia:

θ – temperatūra,

u – vėjo greitis,

T – aplinkos temperatūra,

g – laisvojo kritimo pagreitis.

Paskvilio klasių ir Richardsono skaičių ribinės vertės pateiktos 3 lentelėje.

1.7.5. Tūrinio Richardsono skaičiaus (Ri_B) metodas.

Tūrinis Richardsono skaičius yra apskaičiuojamas naudojantis formule [8]:

$$Ri_B = \frac{g\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta Z}\right)\bar{Z}^2}{T\bar{u}^2}, \quad (6)$$

čia:

$\bar{Z}$ – geometrinis vidurkis tarp dviejų meteorologinių stočių aukščių ($\bar{Z} = \sqrt{Z_1 Z_2}$),

θ – temperatūra,

u – vidutinis vėjo greitis,

T – aplinkos temperatūra,

g – laisvojo kritimo pagreitis.

3 lentelė. Paskvilio stabilumo klasių sąryšis su ribinėmis vertėmis: vėjo krypties standartinio nuokrypio metodui; temperatūros gradiento metodui; vėjo greičio santykio metodui ir Richarsono skaičiaus metodui [7], [8], [9], [13].

Paskvilio klasė	$\sigma_\Theta(^{\circ})$	$\Delta T/\Delta Z, (^{\circ}\text{C}/100\text{m})$	U_R	Ri
A	$22,5 < \sigma_\Theta$	$\Delta T/\Delta Z < -1,9$	$U_R < 1,186$	$Ri < -2,038$
B	$17,5 < \sigma_\Theta \leq 22,5$	$-1,9 \leq \Delta T/\Delta Z < -1,7$	$1,186 \leq U_R < 1,207$	$-2,038 \leq Ri < -0,75$
C	$12,5 < \sigma_\Theta \leq 17,5$	$-1,7 \leq \Delta T/\Delta Z < -1,5$	$1,207 \leq U_R < 1,258$	$-0,75 \leq Ri < -0,18$
D	$7,5 < \sigma_\Theta \leq 12,5$	$-1,5 \leq \Delta T/\Delta Z < 0,5$	$1,258 \leq U_R < 1,59$	$-0,18 \leq Ri < 0,083$
E	$3,75 < \sigma_\Theta \leq 7,5$	$0,5 \leq \Delta T/\Delta Z < 1,5$	$1,59 \leq U_R < 2,29$	$0,083 \leq Ri < 0,16$
F	$2,0 < \sigma_\Theta \leq 3,75$	$1,5 \leq \Delta T/\Delta Z < 4,0$	$2,29 \leq U_R < 3,0$	$0,16 \leq Ri < 0,18$
G	$\sigma_\Theta \leq 2,0$	$\Delta T/\Delta Z \geq 4,0$	$U_R \geq 3,0$	$Ri \geq 0,18$

4 lentelė. Paskvilio stabilumo klasių ribinės vertės tūrinio Richardsono skaičiaus metodui ir Monin Obukhov ilgio metodui [7], [8], [9], [13].

Paskvilio klasė	Ri_B	$1/L$
A	$Ri_B < -0,023$	$1/L < -0,056$
B	$-0,023 \leq Ri_B < -0,011$	$-0,056 \leq 1/L < -0,016$
C	$-0,011 \leq Ri_B < -0,036$	$-0,016 \leq 1/L < -0,004$
D	$-0,036 \leq Ri_B < 0,0072$	$-0,004 \leq 1/L < 0,002$
E	$0,0072 \leq Ri_B < 0,42$	$0,002 \leq 1/L < 0,006$
F	$0,042 \leq Ri_B < 0,84$	$0,006 \leq 1/L < 0,022$
G	$Ri_B \geq 0,84$	$1/L \geq 0,022$

1.7.6. Monin Obukhov ilgio metodas

Monin Obukhov ilgis aprašomas formule [8]:

$$L = -\rho C_p T U^3 / k g H, \quad (7)$$

čia:

ρ – oro tankis temperatūroje T ,

C_p – savitoji šiluminė talpa esant pastoviam slėgiui,

U – trinties greitis,

k – Von Karman konstanta,

H – šilumos srautas.

1.7.7. Vėjo greičio santykio metodas

Šiam metodui yra reikalingi vėjo greičio matavimai dviejuose aukščiuose [8]:

$$U_R = \frac{U_{z2}}{U_{z1}}, \quad (8)$$

čia:

U_{z2} – vėjo greitis viršutiniame matavimo taške,

U_{z1} – vėjo greitis apatiniame matavimo taške.

1.8. Sausojo nusėdimo (proceso) modeliai

Sauso nusėdimo srautas F_s yra apskaičiuojamas žinant radionuklido koncentraciją ore X_s ir nusėdimo greitį V_s tam tikrame aukštyje Z [16]:

$$F_s = X_s \cdot V_s, \quad (9)$$

čia:

F_s – sauso nusėdimo srautas ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$),

X_s – radionuklido koncentracija ore ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) aukštyje Z ,

V_s – radionuklido nusėdimo greitis (m/s),

s – sausasis nusėdimas.

Sauso nusėdimo srautas paprastai skaičiuojamas kas valandą ir sumuojamas, norint žinoti bendrą (integrinį) srautą per tam tikrą laikotarpį. Nusėdimo srauto vienetai yra g/m^2 arba Bq/m^2 [16].

1.8.1. Dalelių sausasis nusėdimas

Kietųjų dalelių nusėdimo greitis modeliuojamas naudojant varžų modelį, kuriame nusėdimo greitį lemia dalelių dydis ir jų dydžio išbarstymas [16].

1.8.2. Pirmasis metodas

Sausas nusėdimas paprastai parametrizuojamas pagal analogiją su varžomis ir elektros tekėjimu jomis. Laikoma, kad teršalų nusėdimas iš atmosferos ant žemės paviršiaus susideda iš dviejų varžų: aerodinaminės varžos ir kvazilaminarinio sluoksnio varžos [16].

Pirmasis metodas yra naudojamas, kai daugumos (daugiau nei 10 procentų) kietųjų dalelių ore (aerozolių) skersmuo yra $10 \mu\text{m}$ ar didesnis. Norint taikyti šį metodą turi būti žinomas dalelių dydžių pasiskirstymas [4].

Dalelių sausojo nusėdimo greitis V_{ds} taikant pirmąjį metodą [4]:

$$V_{ds} = \frac{1}{R_a + R_{kv} + R_a R_{kv} V_g} + V_g, \quad (10)$$

čia:

V_{ds} – dalelių sausojo nusėdimo greitis (m/s),

R_a – aerodinaminė varža (s/m),

R_{kv} – kvazilaminarinio sluoksnio varža (s/m),

V_g – gravitacinis nusėdimo greitis (m/s).

Aerodinaminė varža R_a yra apskaičiuojama [16]:

- Stabiliomis ir neutraliomis sąlygomis ($L > 0$),

$$R_a = \frac{1}{(ku)} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) + \frac{5z}{L} \right], \quad (11)$$

- Nestabiliomis sąlygomis ($L < 0$),

$$R_a = \frac{1}{(ku)} \left[\ln \frac{\left(\sqrt{1-16\frac{z}{L}}-1 \right) \left(\sqrt{1-16\frac{z_0}{L}}+1 \right)}{\left(\sqrt{1-16\frac{z}{L}}+1 \right) \left(\sqrt{1-16\frac{z}{L}}-1 \right)} \right], \quad (12)$$

čia:

k – von Karman konstanta (0,4),

u – trinties greitis (m/s) iš meteorologinių duomenų,

z_0 – paviršiaus grublėtumo aukštis,

L – Monin Obukhov ilgių skalė (m) iš meteorologinių duomenų.

Nykstamai mažo sluoksnio varža R_{kv} yra apskaičiuojama [16]:

$$R_{kv} = \frac{1}{\left(S_c^{-2/3} + 10^{-3}/S_t \right) (1 + 0,24w^2/u^2) u}, \quad (12)$$

čia:

S_c – Schmidt skaičius ($S_c = \nu/D_B$) (bedimensinis),

ν – kinematinė oro klampa ($\approx 0,1505 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, aprašyta toliau),

D_B – kietųjų dalelių Brauno judėjimo difuzijos koeficientas (cm^2/s) ore,

S_t – Stokso skaičius ($S_t = (V_g/g)(u^2/\nu)$) (bedimensinis),

g – gravitacinė konstanta ($9,80616 \text{ m/s}^2$),

w – konvekcijos greitis (m/s) iš meteorologinių duomenų.

Kinematinę oro klampą ν tiksliau galima aprašyti naudojant valandinius oro, temperatūros ir slėgio duomenis [16]:

$$\nu = 0,1505 \cdot 10^{-4} \left(\frac{T_a}{T_0} \right)^{1,772} \left(\frac{P}{P_0} \right) [1 + 0,0132(P - P_0)], \quad (14)$$

čia:

T_a – aplinkos temperatūra (K) iš meteorologinių duomenų,

T_0 – standartinė oro temperatūra (273,16 K),

P – oro slėgis (kPa) iš meteorologinių duomenų,

P_0 – standartinis slėgis (101,3 kPa).

Kietųjų dalelių Brauno judėjimo difuzijos koeficientą D_B galima apskaičiuoti pagal formulę [16]:

$$D_B = 8,09 \cdot 10^{-10} \left[\frac{T_a S_{CF}}{d} \right], \quad (15)$$

čia:

d – dalelių skersmuo (μm),

S_{CF} – poslinkio korekcijos faktorius (bedimensinis), apskaičiuojamas pagal formulę [16]:

$$S_{CF} = 1 + \frac{2x_2(a_1 + a_2 e^{-(a_3 d/x_2)})}{10^{-4} d}, \quad (16)$$

čia:

x_2 , a_1 , a_2 , a_3 yra empirinės konstantos, kurių reikšmės yra, atitinkamai: $6,5 \cdot 10^{-6}$, 1,257, 0,4 ir $0,55 \cdot 10^{-4}$.

Gravitacinis nusėdimo greitis V_g (m/s) yra apskaičiuojamas pagal formulę [16]:

$$V_g = \frac{(\rho_d - \rho_{oro}) g d^2 c_2}{18\mu} S_{CF}, \quad (17)$$

čia:

ρ_d – dalelių tankis ($1,88 \text{ g/cm}^3$ ceziui),

ρ_{oro} – oro tankis ($\approx 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$),

μ – absoliutinė oro klampa ($\approx 1,81 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm/s}$),

c_2 – oro vienetų konvertavimo konstanta ($1 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\mu\text{m}^2$) [1].

1.8.3. Antrasis metodas

Antrasis metodas yra naudojamas, kai dalelių dydžių skirstinys nėra gerai žinomas arba, kai skirstinį sudaro didelės dalelės ($\leq 10\%$ nuo bendros masės), tokios, kurių skersmuo yra $10 \mu\text{m}$ ir didesnis [16]:

$$V_{ds} = f V_{dsm} + (1 - f) V_{dsd}, \quad (18)$$

čia:

V_{ds} – bendras dalelių sausojo nusėdimo greitis (m/s),

f – kietųjų dalelių dalis, kurios yra mažesnės nei $2,5\mu\text{m}$ skersmens,

V_{dsm} – nusėdimo greitis (m/s) smulkioms kietosioms dalelėms, apskaičiuojamas iš (17) lygties V_g

laikant nulių: $V_{\text{dsm}} = \frac{1}{R_a + R_p}$,

V_{dsd} – nusėdimo greitis (m/s) stambioms kietosioms dalelėms, apskaičiuojamas iš (17) lygties

laikant $V_g = 0,002$ m/s; $V_{\text{dsd}} = \frac{1}{R_a + R_{kv} + 0,002R_aR_{kv}} + 0,002$.

Antrajam metodui aerodinaminė varža yra apskaičiuojama naudojant (12) lygtį, o kvazilaminaraus sluoksnio varža R_{kv} yra nustatoma remiantis sulfatų drėgnuojų nusėdimu [16].

- Stabiliomis ir neutraliomis sąlygomis ($L > 0$),

$$R_p = \frac{500}{u}, \quad (19)$$

- Nestabiliomis sąlygomis ($L < 0$),

$$R_p = \frac{500}{u \left(1 - \frac{300}{L}\right)}. \quad (20)$$

1.9. Drėgnojo nusėdimo (proceso) modeliai

1.9.1. Dalelių drėgnasis nusėdimas

Drėgnojo nusėdimo srautas kietosioms dalelėms F_{dr} yra apskaičiuojamas pasinaudojant drėgnojo išplovimo koeficientu [16]:

$$F_{\text{dr}} = 10^{-3} \rho_d W r, \quad (21)$$

čia:

F_{dr} – dalelių srautas dėl drėgnojo nusėdimo ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$),

ρ_d – vidutinė dalelių koncentracija ore ($\mu\text{g}/\text{m}^3$),

W – dalelių išplovimo koeficientas (bedimensinis),

r – kritulių kiekis (mm/h) iš meteorologinių duomenų.

Drėgnojo nusėdimo srautas yra skaičiuojamas kas valandą, o vėliau yra sumuojamas norint gauti suminį srautą per tam tikrą laiką. Drėgnojo nusėdimo srauto vienetai yra g/m^2 . Konstanta 10^{-3} yra konvertavimo konstanta, reikalinga išreikšti kritulių kiekį m/h [16].

Vidutinė dalelių koncentracija ρ_d yra apskaičiuojama integruojant vertikalios narius V_j Gauso šleifo modelio lygtį pagal dalelių dydžius j , intervale nuo 0 iki z [16]:

$$\int_0^z \left(\frac{V_j}{\sigma_z} \right) dz = \sqrt{2\pi}, \quad (22)$$

čia:

V_j – Gauso vertikalios narys dalelių dydžiams j ,

σ_z – vertikalios dispersijos koeficientas (m),

z – debesies viršaus aukštis arba maišymosi aukštis, priklausomai nuo to, kuris didesnis (m).

Debesies viršaus aukštis, naudojamas apibrėžti z , yra apskaičiuojamas kaip debesies centro linijos aukštis, pridėjus $2,15 \cdot \sigma_z$, nustatomas 20 kilometrų atkarpoje pavėjui [16].

Dalelių išplovimo koeficientas W yra apskaičiuojamas [16]:

$$W = \frac{3zE}{2D_1}, \quad (23)$$

čia:

E – susidūrimų efektyvumas (bedimensinis),

D_1 – vidutinis lietaus lašų skersmuo (m), lygus $r^{0,232}/905,5$; kritulių kiekis r nusakomas mm/h [16].

1.9.2. Dujinis drėgnojo nusėdimo srautas

Drėgnojo nusėdimo srautas dujoms F_{duj} yra apskaičiuojamas [16]:

$$F_{\text{duj}} = 10^6 C_s M r, \quad (24)$$

čia:

F_{duj} – dujinių teršalų srautas dėl drėgnojo nusėdimo ($\mu\text{g/m}^2/\text{h}$),

C_s – skystų teršalų koncentracija (mol/l),

M – molekulinė teršalų masė (g/mol).

Drėgnojo nusėdimo srautas yra skaičiuojamas kas valandą, o vėliau yra sumuojamas, norint gauti suminį srautą per tam tikrą laikotarpį. Integrinio drėgnojo nusėdimo srauto vienetai yra g/m^2 arba Bq/m^2 . Konstanta 10^6 yra konvertavimo konstanta, reikalinga išreikšti kritulių kiekį m/h , tūrį m^3 ir masę g . Dujinis drėgnojo nusėdimo srautas yra laikomas toks pats visiems kritulių tipams [16].

Skystų teršalų koncentracija C_s yra apskaičiuojama remiantis prisotinta koncentracija C_{sot} ir lašų prisotinimo dalimi f_{sot} [16]:

$$C_l = f_{\text{sot}} C_{\text{sot}}, \quad (25)$$

čia:

f_{sot} – lašų prisotinimo dalis (bedimensinis),

C_{sot} – skystų teršalų koncentracija prisotinimo metu (mol/l).

Skystų teršalų koncentracija prisotinimo metu C_{sot} yra apskaičiuojama [16]:

$$C_{\text{sot}} = \frac{\rho R T_a}{H M 10^9 \left[1 + \frac{L_1 R T_a}{\rho H} \right]}, \quad (26)$$

čia:

ρ – dujinių teršalų vidutinė koncentracija ($\mu\text{g/m}^3$),

R – universalioji dujų konstanta $8,3145 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$,

L_1 – vandens kiekis krentančiuose lašuose (g/m^3), lygus $r^{0,889}/13,28$; kritulių kiekis r išreikštas mm/h .

Dujinių teršalų vidutinė koncentracija ore ρ yra apskaičiuojama taip pat, kaip dalelių vidutinė koncentracija ρ_d (14) lygtyje. Konstanta 10^9 yra konvertavimo konstanta, reikalinga išreikšti tūrį m^3 ir masę g [16].

Lašų prisotinimo dalis f_{sot} yra apskaičiuojama [16]:

$$f_{\text{sot}} = \text{MIN} \left(1, \frac{t}{t_{\text{abs}}} \right), \quad (27)$$

čia:

t – lašo gyvavimo laikas debesyje arba paribio sluoksnyje (s),

t_{abs} – lietaus lašų prisotinimo laikas (absorbcijos laikas) (s):

$$t = \frac{z}{V_{\text{krit}}}, \quad (28)$$

čia:

z – debesies viršaus aukštis arba maišymosi aukštis, priklausomai nuo to, kuris didesnis (m),

V_{krit} – lašų kritimo greitis (m/s), kuris lygus $3,75 r^{0,111}$, kur r yra kritulių kiekis išreikštas mm/h [16].

1.9.3. Debesies išsivalymas

Išsivalymo faktorius yra šaltinio stiprumo taške x (sumažėjusio dėl išsekimo) ir pradinio šaltinio stiprumo santykis. Jis yra apskaičiuojamas pagal formulę [16]:

$$\frac{Q(x)}{Q_0} = e^{-\lambda t}, \quad (29)$$

čia:

Q_0 – pradinis šaltinio stiprumas (g/s),

$Q(x)$ – šaltinio stiprumas taške x (pavėjui), sumažėjęs dėl išsekimo (g/s),

λ – radionuklido išplovimo konstanta (s^{-1}),

t – teršalų keliavimo laikas iki taško x (s), lygus x/u (u – vėjo greitis).

Šaltinio išsekimas yra apskaičiuojamas [16]:

$$Q(x) = Q_0 \exp \left[- \int_0^x \frac{V_d}{u} \bar{D}(x) dx \right], \quad (30)$$

čia:

Q_0 – pradinis šaltinio intensyvumas (g/s),

$Q(x)$ – šaltinio stiprumas taške x (pavėjui), sumažėjęs dėl šaltinio išsekimo (g/s),

V_d – nusėdimo greitis (m/s),

u – vėjo greitis (m/s),

$\bar{D}(x)$ – suminis išplitimas dėl šoninio vėjo $\bar{D} = \bar{X} u / Q$ (m^{-1}),

$\bar{X}$ – suminė radionuklidų koncentracija, išsklaidoma šoninio vėjo (g/m^2) [16].

Taigi, šiame skyriuje buvo apžvelgti pagrindiniai sunkiųjų AE avarių nulemtų radiologinių pasekmių vertinimo aspektai – šaltinio apibrėžimas, radionuklidų sklaidos modeliai ir atmosferos parametrai, kurie yra svarbūs vertinant sklaidą.

2. TYRIMO METODIKA

2.1. Pasekmių tikimybiniis vertinimas

Įvykus atominių elektrinių avarijoms radionuklidai pasklinda dideliais atstumais, pakilę į viršutinius atmosferos sluoksnius, o, dėl besikeičiančios vėjo krypties ir kitų meteorolignių sąlygų, radionuklidų koncentracija gali drastiškai skirtis greta esančiose vietovėse. Radionuklidų koncentracija yra vaizduojama kontūrinėmis linijomis ir galima tiksliai nustatyti jų koncentraciją konkrečiose koordinatėse. Toks duomenų atvaizdavimas tapo labai populiarus, o kartu ir lengviau analizuojamas [17].

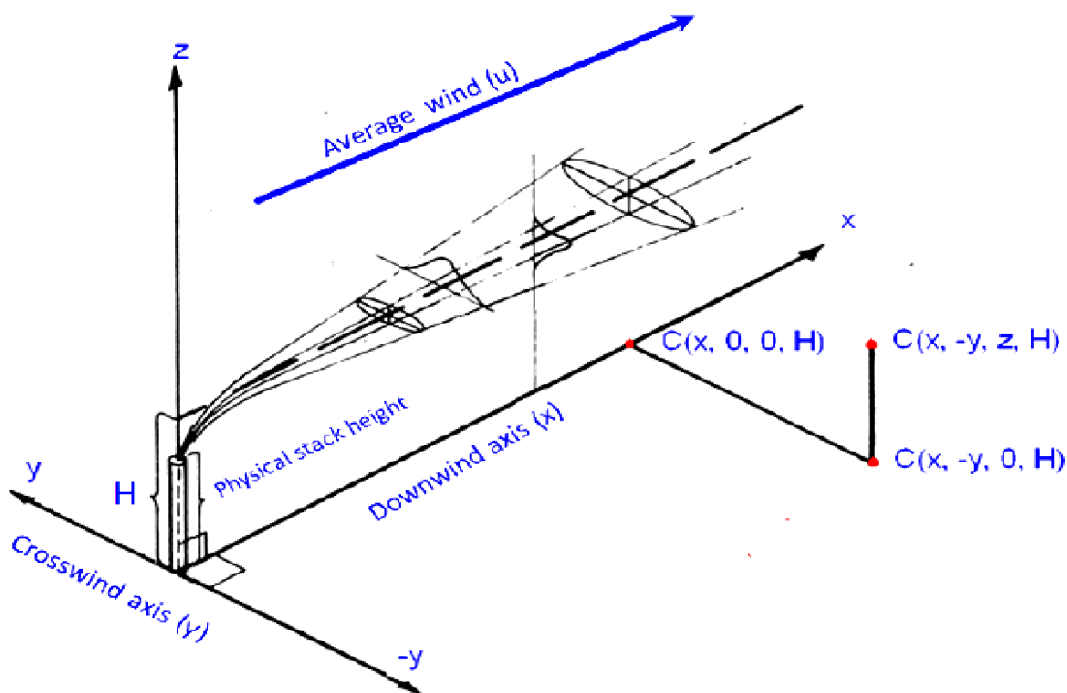
Vertinant potencialų branduolinių objektų keliamą pavojų tampa problematiška tiksliai apibrėžti pavojaus mastą. Šios problemos nebelieka skaičiuojant tikimybę įvykti apibrėžto masto avarijai. Toks principas naudojamas ir šiame darbe, tačiau skaičiuojama ne tikimybė įvykti avarijai, bet tikimybė, įvykus apibrėžto masto avarijai, radionuklidams pasklisti erdvėje ir užteršti teritorijas (iki 200 km atstumu) [17].

2.2. Šaltinio įvertinimo programa PC COSYMA 2.0

COSYMA (toliau Cosyma) yra tikimybinė branduolinių avarijų padarinių vertinimo kompiuterinė programa. Ši programa sukurta NRPB (angl. National Radiological Protection Board) ir KfK (vok. Kernforschungszentrum Karlsruhe) organizacijų, kaip dalis Europos komisijos projekto MARIA. Ji turi didelę biblioteką numatytųjų parametrų, kurie naudojami skaičiavimuose. Programa suteikia galimybę detalizuoti modeliuojamo maketo tam tikrus parametrus, tokius, kaip gyventojų populiacijos dydis, agrokultūrų paplitimas ar meteorologiniai duomenys, kurie imami iš vienos stoties, tad vėjo kryptis yra laikoma ta pati visuose modeliuojamos plokštumos taškuose, programa neįskaityto oro srovių pasikeitimų. Taip pat yra galimybė duomenis apskaičiuoti pagal nekintančių arba kintančių (laiko atžvilgiu) parametrų grupę. Programa Cosyma pateikia rezultatus apie radionuklidų koncentraciją ore ir jų nusėdimą, dozes žmogaus organuose, apsaugomųjų priemonių (pvz., evakuacijos) taikymą mažinant avarijos padarinius, taip pat individualią ir kolektyvinę ankstyvųjų ir vėlyvųjų padarinių sveikatai riziką. Rezultatai programoje pateikiami lentelių ir grafikų pavidalais. Taip pat sistema sukuria atskirą rezultatų bylą, kuri vėliau gali būti naudojama tolimesniems skaičiavimams. Programa turi ir minusų. Nėra atsižvelgiama į galimai kitokias oro sąlygas kituose modeliuojamos plokštumos taškuose, vėjo kryptis ir greitis visuose taškuose yra laikomas vienodu. Programa nepateikia modeliuojamų rezultatų pasikliautinųjų intervalų [18 – 20].

2.3. Teršalų Gausinio pasiskirstymo šleife modelis

Programa Cosyma naudoja teršalų Gausinio pasiskirstymo šleife modelį (toliau Gauso modelis). Gauso modelis plačiai naudojamas ir yra pagrindinis įrankis dispersijos atmosferoje skaičiavimams. Gauso modelyje (9 pav.) x ašis yra lygiagreti vėjo kryptčiai (angl. downwind axis), y ašis rodo šoninio vėjo kryptį (angl. crosswind axis), o z ašis yra statmena žemės paviršiui, taip pat atsižvelgiama į aplinką teršiančias medžiagas išmetančio kamino aukštį (angl. physical stack height) ir vidutinį vėjo greitį u (angl. average wind) (m/s) [18].



9 pav. Teršalų sklaidos atmosferoje Gauso modelio koordinačių sistema [18].

Gauso modelio lygtis apibrėžia laike suintegruotas atmosferos dujų ar aerozolių koncentracijas bet kuriame taške erdvėje [18]:

$$C_i(x, y, z, H) = \frac{Q_i}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \exp \left[-\frac{\lambda x}{u} \right] DF(x) F_w \quad (31)$$

čia:

$C_i(x, y, z, H)$ – i -tojo radionuklido koncentracija bet kuriame erdvės taške,

Q_i – i -ojo tipo radionuklido šaltinio galia, t. y., per vieną sekundę į atmosferą išmetamas šio radionuklido aktyvumas (Bq),

y – horizontalusis nuotolis nuo šleifo centrinės ašies (m),

z – vertikalusis nuotolis nuo šleifo ašies (m),

H – efektinis išmetimo aukštis (tai išmetimo šaltinio fizinio aukščio virš paviršiaus suma su papildomu išmetamo srauto šiluminio pakėlimo aukščiu, apskaičiuojamu pagal Briggs formules),

u – vidutinis vėjo greitis ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),

σ_y, σ_z – vidutiniai nuokrypiai, aprašantys radionuklidų normalųjį koncentracijos pasiskirstymą debesyje atitinkamos koordinatės kryptimi (m),

λ – i -ojo radionuklido radioaktyvaus skilimo konstanta (s^{-1}),

$DF(x)$ – debesies savivalos faktorius dėl sausojo radionuklidų nusėdimo,

F_w – debesies savivalos faktorius dėl drėgnojo radionuklidų nusėdimo.

Debesies savivalos dėl sausojo radionuklidų nusėdimo faktorius $DF(x)$ apskaičiuojamas remiantis šia formule [18]:

$$DF(x) = \left[\exp \int_0^x \frac{1}{\sigma_z(x) \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z(x)} \right)^2 \right]} dx \right]^{-\frac{v}{u} \sqrt{\frac{2}{\pi}}} \quad (32)$$

čia:

$DF(x)$ – debesies savivalos faktorius dėl sausojo radionuklidų nusėdimo,

x – atstumas vėjo kryptimi (m),

v – nusėdimo greitis (cm/s),

u – vidutinis vėjo greitis efektyviame išmetimo aukštyje H (m/s),

H – efektinis išmetimo aukštis (m),

$\sigma_z(x)$ – vidutinis nuokrypis, aprašantis radionuklidų normalųjį koncentracijos pasiskirstymą debesyje vertikalios koordinatės kryptimi (z ašimi) (m).

Debesies drėgnosios savivalos nuo radionuklidų faktorius apskaičiuojamas [21]:

$$F_w = e^{-\lambda x/u}, \quad (33)$$

čia:

F_w – debesies savivalos faktorius dėl drėgnojo radionuklidų nusėdimo,

λ – drėgnojo išplovimo konstanta (s^{-1}),

x – atstumas vėjo kryptimi (m),

u – vidutinis vėjo greitis (m/s).

Drėgnojo išplovimo konstanta Λ gaunama [21]:

$$\Lambda = a \cdot I_0^b, \quad (34)$$

čia a ir b yra empiriniai koeficientai:

$a = 8 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ aerosoliams arba $8 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1} \text{ CH}_3\text{I}$,

$b = 0,8$ aerosoliams arba $0,6$ jodui,

I_0 – lietaus intensyvumas (mm/h).

Drėgnasis nusėdimas dažniausiai laikomas dvejopos prigimties: vienas modelis apima radionuklidų pašalinimą iš debesies kartu su lietumi, šiuo atveju radionuklidai patenka į lietaus lašelius dar jiems besiformuojant, o kitas nusako radionuklidų išplovimą iš atmosferos oro, krentant jau susiformavusiems lietaus lašams. Kaip ir dauguma programų, Cosyma abu šiuos modelius sujungia į bendrą radionuklidų išplovimo procesą [18 – 21].

2.4. Modeliuojamo atvejo parametrų aprašymas

Meteorologiniai duomenys yra gauti iš Ignalinos atominės elektrinės aikštelėje esančio meteorologinių sąlygų stebėjimų bokšto. Šie duomenys yra labai vertingi ir reti. Didelė jų vertė atsiranda dėl ilgą laiką vykdytų periodinių matavimų, duomenų autentiškumo, matuotų parametrų įvairovės. Meteorologinė stotis privalėjo veikti veikiant atominei elektrinei ir einamuoju momentu, esant reikalui, pateikti duomenis. Toks stebėjimas leidžia nustatyti tinkamiausius momentus, kada galima į atmosferą išleisti mažo aktyvumo arba trumpos pusėjimo trukmės dujinius radionuklidus. Meteorologinėje stotyje matavimai buvo atliekami aštuonis kartus per parą, kas 3 valandas (03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00, 00:00 valandomis). Gauti duomenys apie vėjo kryptį, vidutinį vėjo greitį, maksimalų vėjo greitį, oro temperatūrą prie žemės paviršiaus, oro temperatūrą 40 m aukštyje, atmosferos slėgį, santykinę oro drėgmę ir kritulių kiekį. Yra periodų, kurie turi daugiau duomenų, tokių kaip dirvožemio temperatūra ar radiacinis fonas aplinkoje, tačiau šie duomenys fiksuoti ne visą laiką. Modeliavimui naudoti 2015 m. – 2017 m. meteorologiniai duomenys.

Pasinaudojant PC Cosyma programa buvo modeliuojami galimos Astravo ir Kaliningrado atominių elektrinių sunkiųjų avarių padariniai. Laikoma, kad šių hipotetinių avarių metu, į aplinką buvo išmesta 50 % viename reaktoriuje susikaupusių radionuklidų (inventoriaus). Išmetimo aukštis nustatytas 40 m ir tai atitinka tipinio suslėgto vandens reaktoriaus stogą. Modeliavimams naudoti meteorologiniai duomenys nuo 2015 m. iki 2017 m. imtinai [22]. Sumodeliuoti tikimybinį radionuklidų pasiskirstymą tokiam ilgam periodui užimtų labai ilgą laiką. Vienas modeliavimo ciklas su iš anksto pasiruoštais duomenimis trunka apie 20 – 30 min., norint sumodeliuoti avarijas kiekvieną dieną trijų metų laikotarpiui reikėtų 1095 modeliavimų, kurie užtruktų daugiau kaip 365 valandas. Siekiant optimizuoti skaičiavimo laiką, modeliavimai atliekami kas mėnesį, naudojant pirmų penkių mėnesio dienų meteorologinius duomenis. Tokio sprendimo dėka vienos elektrinės avarijai sumodeliuoti reikia atlikti 36 modeliavimo ciklus, kurie truks daugiau kaip 12 valandų ir kartu bus gautas pakankamas kiekis duomenų suvidurkinimo skaičiavimams. Modeliuojant skaičiuojama suminė apšvitos dozė gyventojams surinkta per 5 dienas po avarijos ir paviršinis užterštumas ¹³⁷Cs radionuklidu. 5-oje lentelėje pateikiama dalis meteorologinių duomenų failo.

5 lentelė. Meteorologinių duomenų failo dalis (pavyzdys).

Meteorologiniai duomenys				
Vėjo kryptis (laipsniais)	Atmosferos stabilumo klasė	Kritulių kiekis (mm/h)	Vėjo greitis (m/s)	Maišymosi sluoksnio aukštis (m)
0	4	0	0,50	560
40	4	0	1,50	560
50	4	0	0,50	560
80	4	0	2,10	560
60	4	0	2,60	560
60	4	0	2,10	560
70	4	0	2,10	560
90	4	0	2,10	560
90	4	0	1,50	560
100	4	0	2,10	560
90	4	0	2,10	560
70	4	0	3,10	560
90	4	0	2,60	560
90	4	0	2,60	560
90	4	0	2,10	560
80	4	0	1,50	560
110	4	0	2,10	560
80	4	0	1,50	560
70	4	0	2,60	560
70	4	0	3,10	560

Pirmame stulpelyje yra vyraujanti vėjo kryptis laipsniais pagal laikrodžio rodyklę. Antrame stulpelyje atmosferos stabilumo klasė. 1 atitinka A klasę, 2 – B klasę, 3 – C klasę, 4 – D klasę, 5 – E klasę, 6 – F klasę [21]. A klasė yra pati nestabiliausia, D klasė nusako neutralias sąlygas, F klasė nusako pačias stabiliausias atmosferos sąlygas ir tuo pačiu pačią mažiausią radionuklidų skersinę sklaidą. Trečiame stulpelyje yra kritulių kiekis milimetrais per valandą [23]. Ketvirtame stulpelyje yra vyraujantis vėjo greitis dešimties metrų aukštyje. Penktame stulpelyje yra atmosferos sluoksnio maišymosi aukštis metrais. Kiekvienoje eilutėje yra meteorologiniai duomenys kas valandą nuo avarijos valandos. Iš viso duomenų faile yra 120 eilučių – tai atitinka penkių parų laikotarpį [19], [24]. Naudojant šiuos meteorologinius duomenis atliekamas avarijos pasekmių modeliavimas. Cosyma sugeneruoja rezultatų failą, kurio dalis pateikiama 6-oje lentelėje.

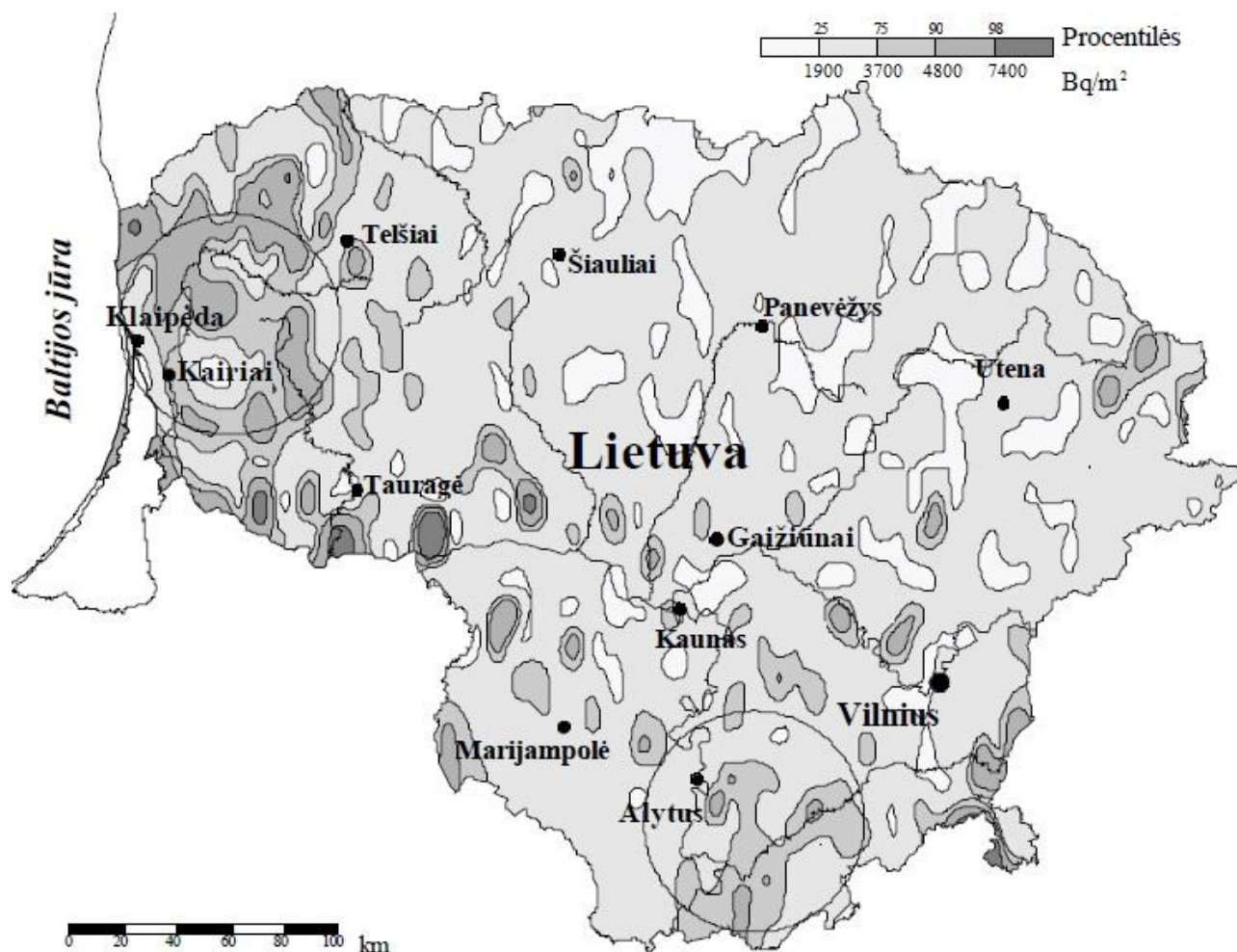
6 lentelė. Cosyma generuojamo rezultatų failo dalis. Suminė efektinė apšvitos dozė gyventojams (mSv) surinkta per 5 dienas.

Sektorius /atstumas	0,50 km	1,15 km	1,55 km	2,10 km	2,80 km	3,70 km	4,90 km	6,55 km	8,75 km	11,50 km
1	1910,00	507,00	321,00	214,00	159,00	124,00	88,20	13,20	11,40	11,80
2	1680,00	422,00	262,00	173,00	129,00	100,00	67,40	11,30	9,78	11,10
3	1140,00	241,00	144,00	95,70	74,30	56,20	31,90	7,27	5,83	6,44
4	581,00	95,70	56,70	43,20	38,10	26,90	11,40	3,72	2,41	2,29
5	219,00	28,80	21,60	22,80	22,00	13,00	4,15	1,50	0,68	0,49
6	59,30	10,20	12,20	15,50	13,80	6,34	1,61	0,47	0,13	0,06
7	17,50	6,61	9,18	11,10	8,42	2,92	0,58	0,11	0,02	0,00
8	37,10	6,96	7,56	7,79	4,89	1,27	0,19	0,02	0,00	0,00
9	133,00	16,70	10,10	6,76	3,27	0,71	0,11	0,02	0,01	0,00
10	357,00	55,90	28,80	14,50	6,49	2,45	0,96	0,41	0,22	0,09
11	709,00	144,00	79,70	42,90	22,70	11,90	6,22	3,53	2,34	1,38
12	1080,00	253,00	151,00	88,70	52,80	31,70	18,90	12,50	9,44	6,95
13	1280,00	307,00	190,00	117,00	74,10	47,20	29,70	20,70	16,00	12,40
14	1210,00	261,00	162,00	104,00	69,20	46,10	30,00	20,40	14,70	10,40
15	975,00	161,00	98,60	66,60	47,80	34,30	23,80	16,20	11,00	7,26
16	790,00	97,80	55,10	36,10	25,90	18,80	13,10	8,74	5,69	3,66
17	844,00	123,00	65,90	36,60	21,40	12,70	7,42	4,42	2,73	1,73
18	1150,00	228,00	128,00	71,30	40,90	23,90	13,80	8,95	6,55	5,03
19	1560,00	360,00	210,00	120,00	70,80	42,20	25,00	16,60	12,60	9,88
20	1820,00	451,00	268,00	157,00	93,90	56,80	34,00	22,70	17,10	13,20

Apskaičiuotos efektinės dozės yra pateikiamos polinėje koordinačių sistemoje, t. y., nusakant kampą, atstumą ir vertę tame taške. Iš viso yra 72 sektoriai – tai reiškia, kad vienas sektorius atitinka 5 laipsnius. Didžiausias skaičiuojamas atstumas yra 210 km nuo modeliuojamo incidento centro.

2.5. Kontroliniai dirvožemio ėminiai

Ėminių paėmimui reikia gerai parinkti vietas, kad gauti rezultatai būtų tikslūs. Remiantis 1987 m. atliktu ^{137}Cs paviršinio aktyvumo tankio matavimu (10 pav.) [20] matyti, kad didžiausias ^{137}Cs aktyvumas yra Klaipėdos ir Tauragės regionuose. Mažesni aktyvumai yra vidurio Lietuvoje ir Dzūkijoje, o šiaurės rytų Lietuvoje aktyvumas yra mažas. Taigi iš šių regionų paimti ėminiai geriausiai reprezentuotų ^{137}Cs iškritų pasiskirstymą Lietuvoje.

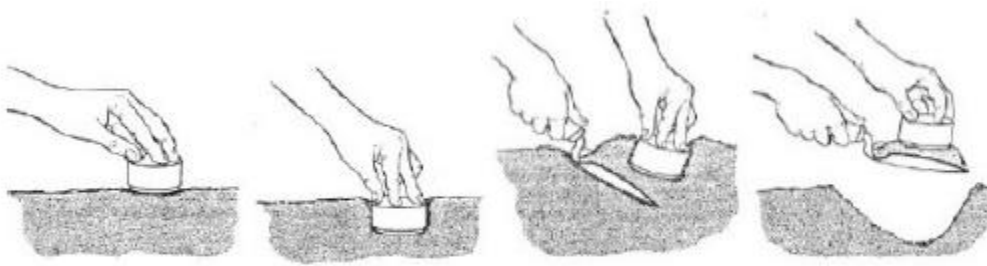


10 pav. ^{137}Cs paviršinio aktyvumo tankio (Bq/m^2) pasiskirstymas, nustatytas spektrometru iš lėktuvo 1987 m. [24]

Taip pat labai svarbu, kad bandinio ėmimo vietoje nebūtų vykdyta žemės ūkio veikla, nes tokiu atveju viršutinis dirvožemio sluoksnis būtų sumaišytas su gilesniais sluoksniais ir informacija apie cezio kiekį dirvožemio paviršiuje būtų netiksli.

2.5.1. Bandinių ėmimas

Ėminiai imami plastmasiniu žiedu, kurio skersmuo 6, o aukštis – 10 cm. Žiedas įkalamas parinkus nesuardyto dirvožemio plotą, kuriame nėra medžių, krūmų ar kitų objektų. Nuėmus žolinę dangą, žiedas įkalamas į dirvožemį, įrankiu iškeliamas dirvožemio ėminys (11 pav.) Kiekvienas toks ėminys dedamas į polietileninį maišelį ar indelį, ant jo užrašomas ėminio vietos pavadinimas [23].



11 pav. Dirvožemio ėmimo pavyzdys [23].

Matavimams mėginiai talpinami į gryno germanio detektorių (12 pav.) - tai cilindras su n-tipo germanio kontaktu išoriniame paviršiuje ir p-tipo kontaktu ašinio šulinio paviršiuje. Paprastai matavimai trunka bent keletą valandų.



12 pav. Puslaidininkinis gama spektrometras (kairėje), bandinys pastatytas ant detektoriaus (dešinėje viršuje), bandinys paruoštas matavimams (dešinėje apačioje).

3. DARBO REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

3.1. Kontrolinių bandinių matavimo rezultatai

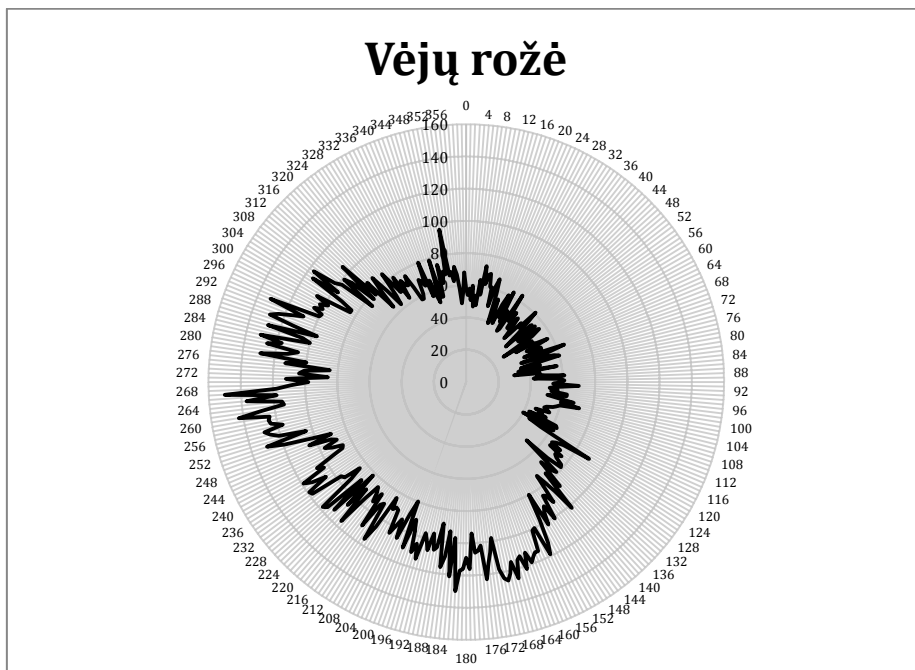
Kontroliniai bandiniai paimti iš 16 skirtingų Lietuvos vietų. Jų tikslas yra nustatyti, koks paviršiaus užterštumas ^{137}Cs yra dabar (foninis lygis), kad ateityje prireikus matavimų rezultatus būtų galima palyginti. Pagal 7-oje lentelėje pateiktus matavimo duomenis matyti, kad didžiausias ^{137}Cs aktyvumas kvadratiname metre yra Giruliuose, Plungėje, Pagėgiuose, o mažiausias – Varėnoje, Kaune ir Kaišiadoryse. Bendrai visų bandinių iškritų tankio aritmetinis vidurkis yra 1066 Bq/m^2 (apskaičiuotas, naudojant 7-os lentelės duomenis). Mažą bandinių aktyvumą gali lemti blogai parinkta bandinio ėmimo vieta, nes, jei dirvožemis toje vietoje yra sumaišytas (per pastaruosius 30 m.), tai ir cezio kiekis dirvožemio paviršiuje yra netikslus.

7 lentelė. Vietovės, iš kurių paimti dirvožemio ėminiai, ir jų ^{137}Cs aktyvumo matavimo rezultatai. Bandiniai surinkti 2016-05-12.

Vietovės pavadinimas	Bandinio aktyvumas, Bq	Paklaida, Bq	Masė, g	Savitasis aktyvumas, Bq/kg	Paklaida, Bq/kg	Iškritų tankis Bq/m ²	Paklaida, Bq/m ²
Merkinė	1,00	0,06	144,2	6,91	0,39	968	33
Paluknys	0,91	0,04	102,0	8,94	0,35	1251	33
Veisėjai	1,04	0,06	119,4	8,71	0,48	1219	40
Varėna	0,19	0,02	107,2	1,80	0,17	252	14
Saulėtekis	0,63	0,03	96,2	6,55	0,32	916	26
Kaunas	0,23	0,02	111,0	2,03	0,21	284	36
Giruliai	4,43	0,19	154,6	28,71	1,21	4020	202
Plungė	1,38	0,09	85,9	16,13	1,05	2258	173
Pagėgiai	1,42	0,11	155,9	9,09	0,68	1273	114
Ukmergė	0,47	0,05	117,8	3,98	0,46	557	76
Jurbarkas	0,74	0,07	158,1	4,70	0,47	658	78
Kaišiadorys	0,36	0,03	150,8	2,38	0,22	334	36
Šiauliai	1,02	0,09	153,9	6,64	0,55	930	93
Šilutė	1,39	0,10	165,8	8,38	0,57	1173	96
Mažeikiai	0,62	0,07	142,1	4,33	0,51	607	85
Panevėžys	0,41	0,03	160,5	2,54	0,18	355	29

3.2. Rezultatai Astravo ir Kaliningrado atominių elektrinių sunkiųjų avarių atveju

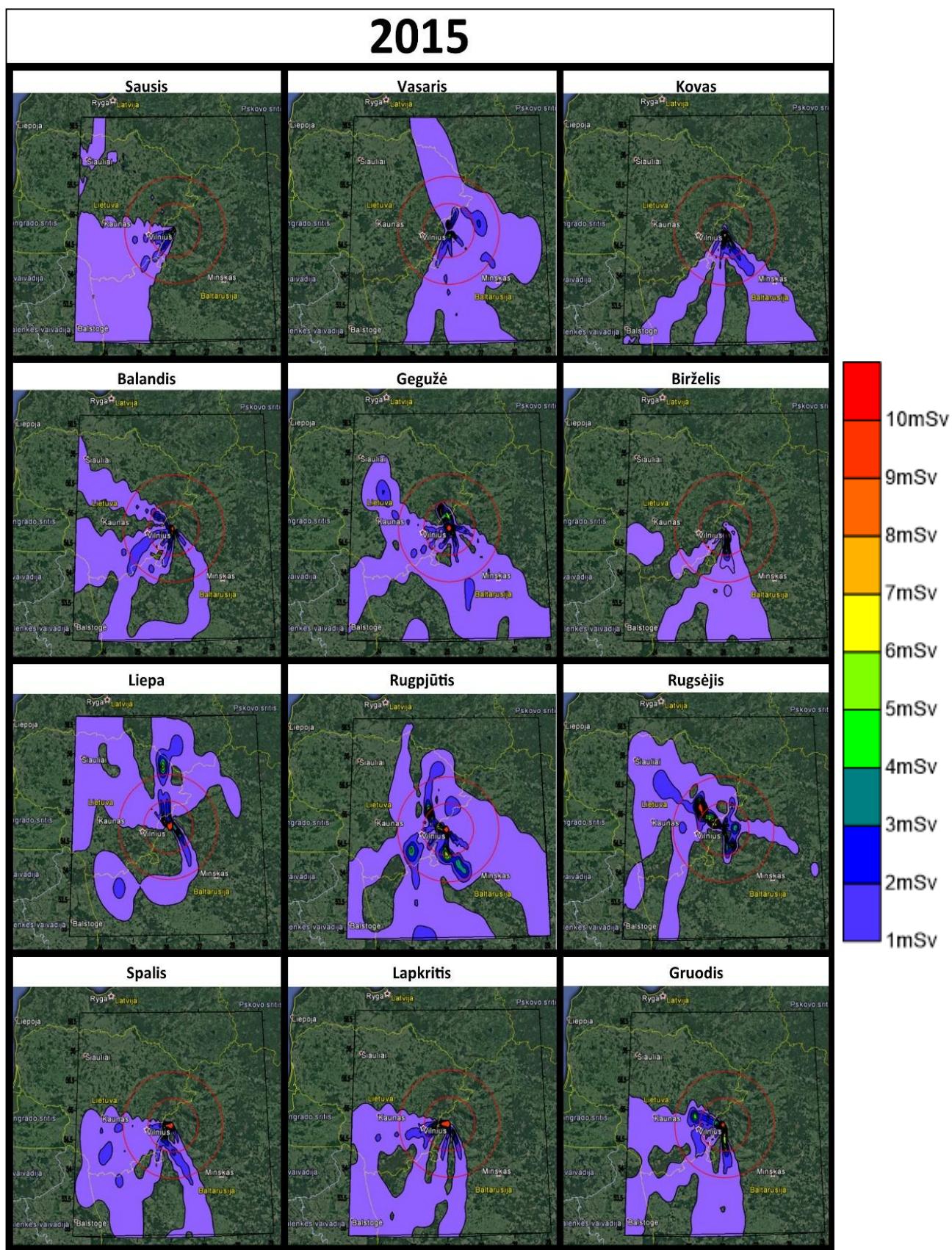
Radionuklidų sklaidimui didžiausią įtaką daro meteorologinės sąlygos. Nuo vėjo krypties priklauso kokia kryptimi radionuklidai keliaus. Žemiau, 13 pav., pateikta vėjų rožė Lietuvoje. Ji gauta panaudojus 10 metų meteorologinius duomenis. Vėjų rožė nusako iš kur pučia vėjas ir rodo vėjo pasikartojimo dažnį ta kryptimi. 0 laipsnių atitinka šiaurę, 90 laipsnių atitinka rytus, 180 laipsnių atitinka pietus, o 270 laipsnių atitinka vakarus. Lietuvoje vyrauja vakarų ir pietvakarių vėjai.



13 pav. Vėjų rožė Lietuvoje.

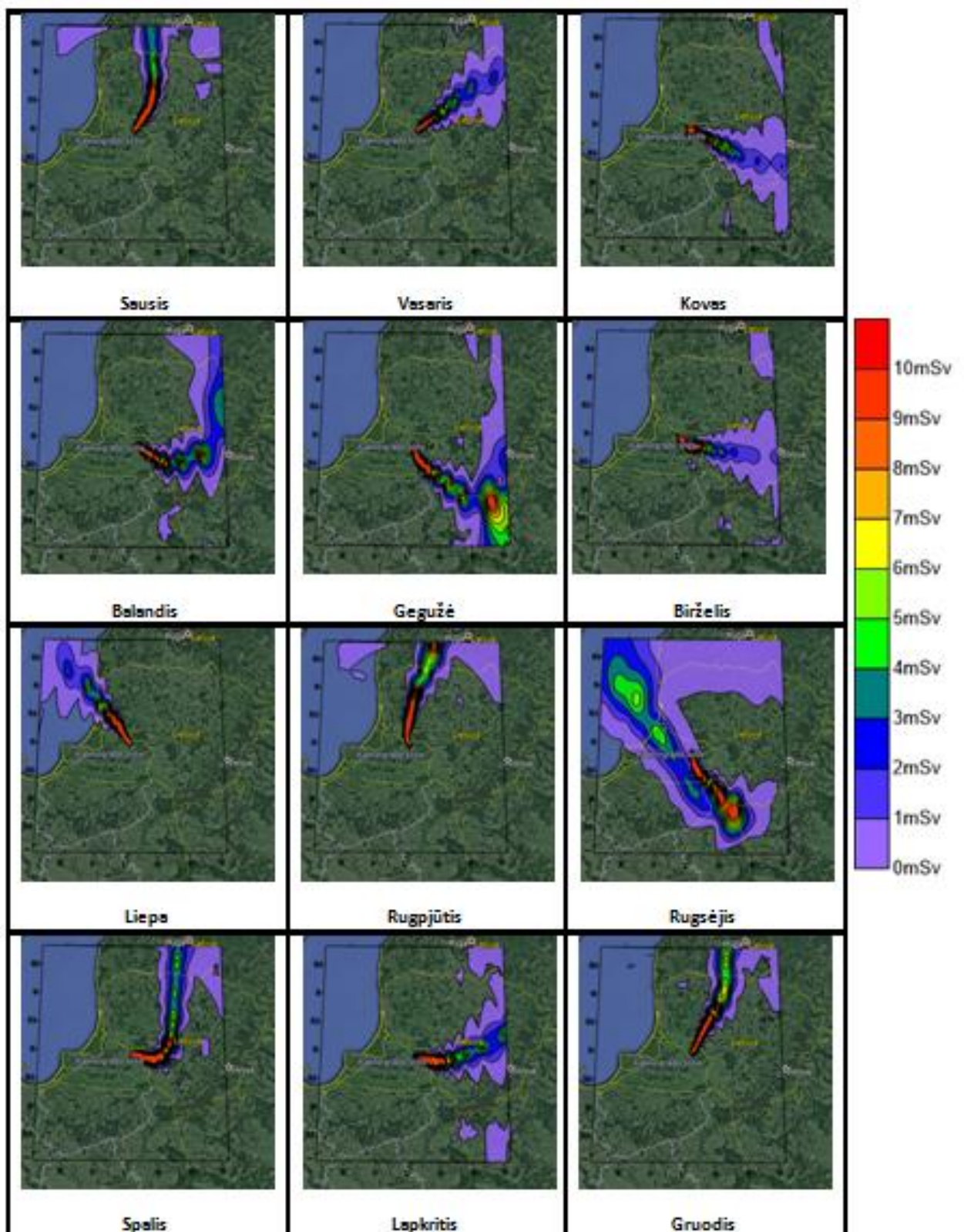
Atlikus radionuklidų sklaidos ir dozių vertinimo skaičiavimus su Cosyma programa hipotetiniams sunkios AE avarijos atvejams, gauti rezultatai vizualizuojami naudojant grafinę programą. Su šia programa sukuriama 74 efektinga apšvitos dozės gyventojams žemėlapių (14 – 19 paveikslai). Iš jų – 37 žemėlapių skirti Astravo AE sunkiajai avarijai, o kita dalis Kaliningrado AE sunkiajai avarijai vizualizuoti. Apšvitos skalė (mSv) yra pateikta dešinėje žemėlapių pusėje ir yra bendra visiems žemėlapiams. Minimalaus kontūro riba, žymima violetine spalva, yra 0,1 mSv, o maksimali riba nėra nustatyta, tad 10 mSv kontūras, žymimas raudona spalva, žymi apšvitą nuo 10 mSv ir daugiau. Žemėlapiuose nubrėžti du apskritimai. Pirmojo spindulys yra 50 km. Tai minimalus ilgalaikių apsaugos priemonių zonos atstumas, siūlomas Tarptautinės atominės energetikos agentūros. Astravo atominės elektrinės šios zonos riba yra prie pat Vilniaus miesto. Antrojo apskritimo spindulys yra 100 km nuo Astravo atominės elektrinės aikštelės. Tai minimalus

apsaugos priemonių planavimo zonos atstumas siūlomas Tarptautinės atominės energetikos agentūros.



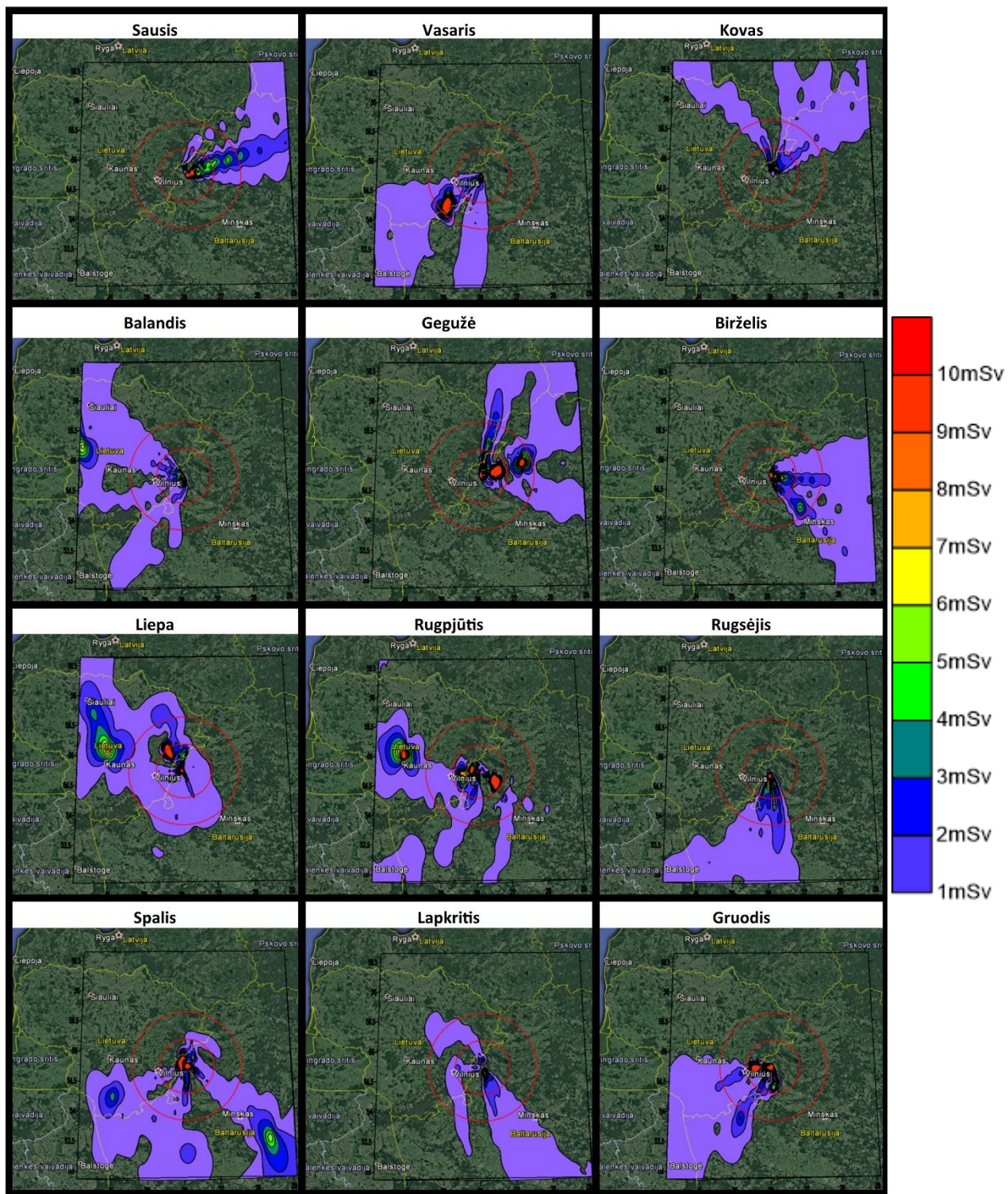
14 pav. 2015 m. kiekvieną mėnesį gauti galimos sunkios Astravo AE avarijos padarinių žemėlapiai.

2015



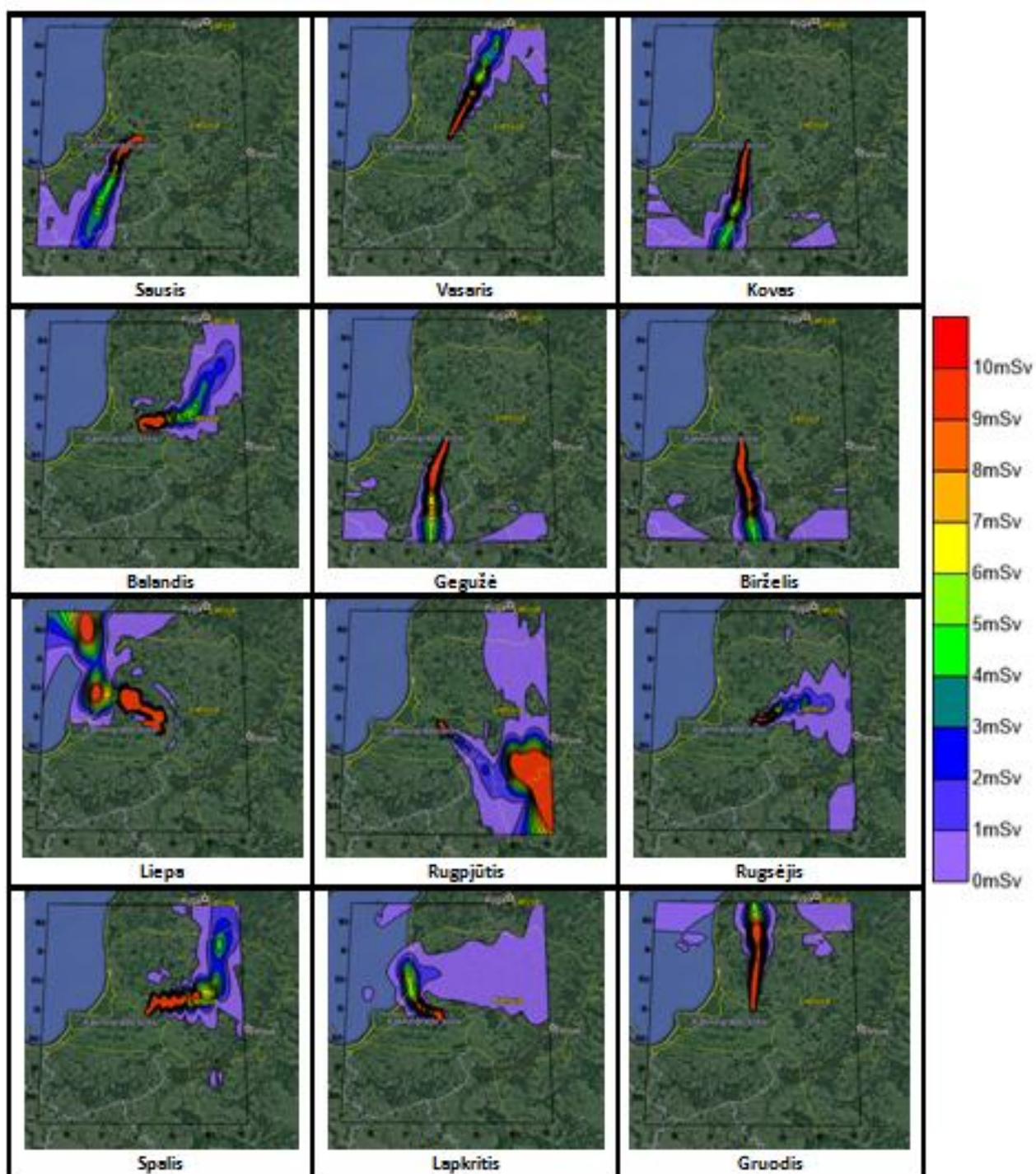
15 pav. 2015 m. kiekvieną mėnesį gauti galimos sunkiosios Kaliningrado AE avarijos padarinių žemėlapiai.

2016



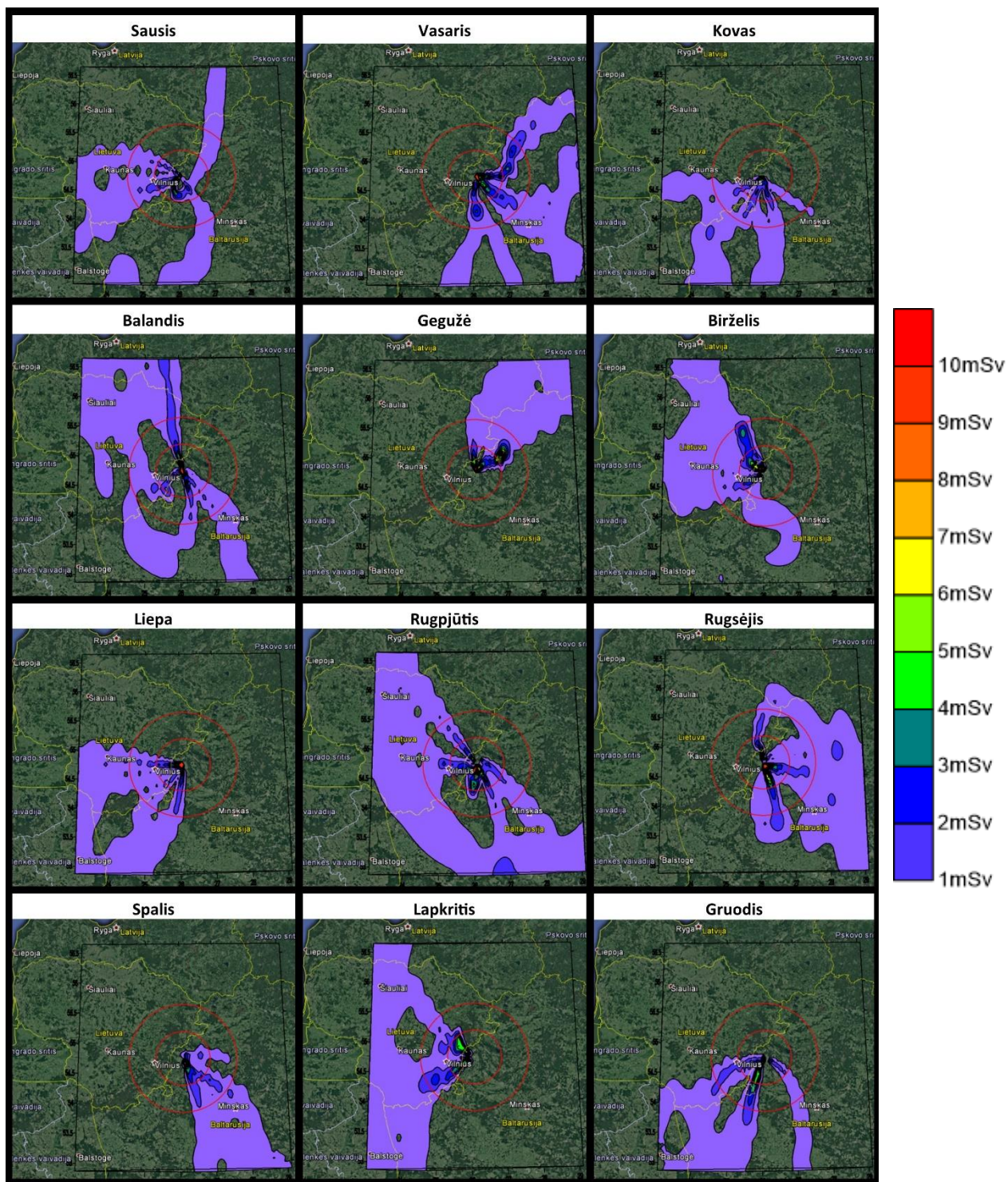
16 pav. 2016 m. kiekvieną mėnesį gauti galimos sunkios Astravo AE avarijos padarinių žemėlapiai.

2016



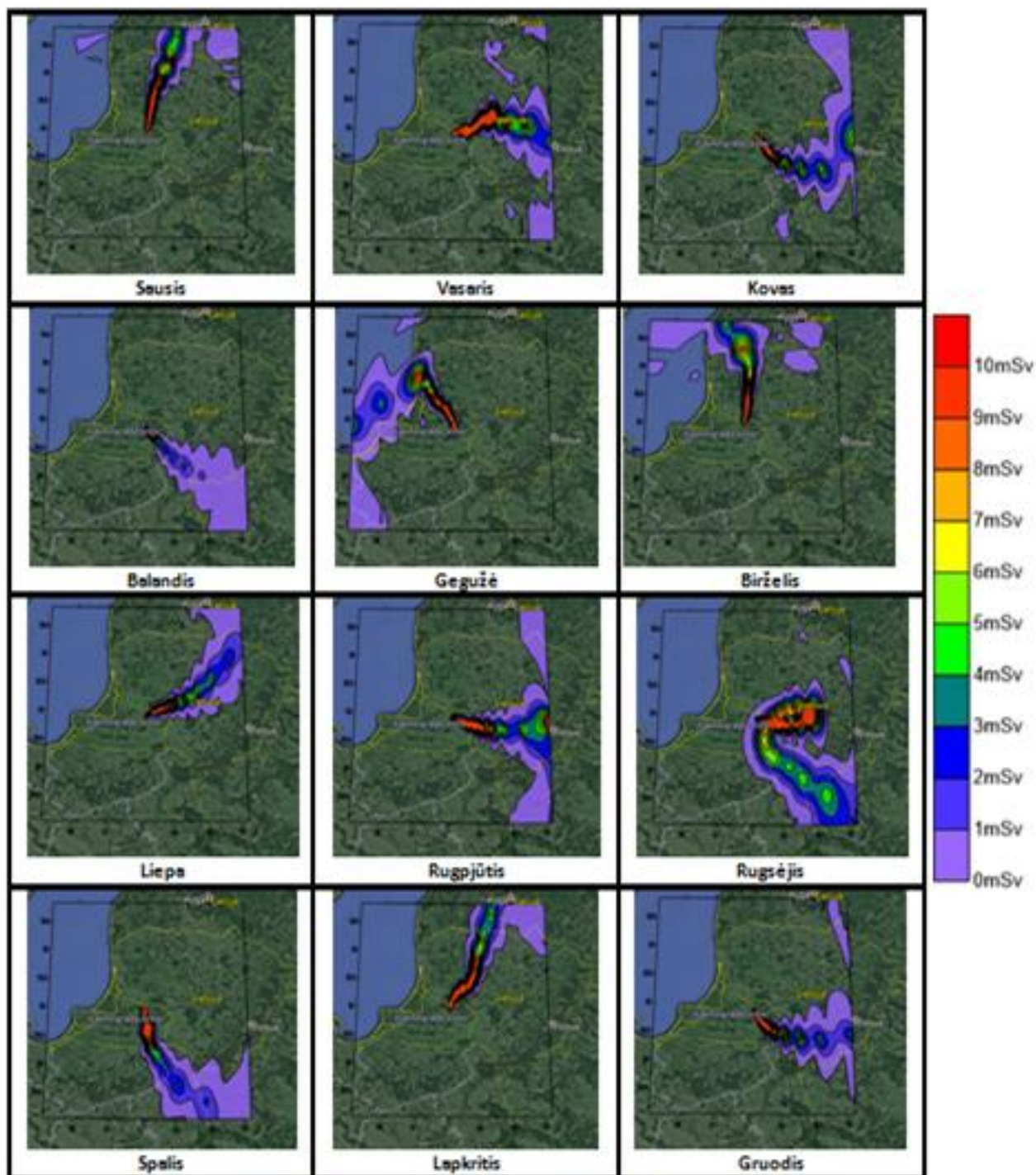
17 pav. 2016 m. kiekvieną mėnesį gauti galimos sunkiosios Kaliningrado AE avarijos padarinių žemėlapiai.

2017



18 pav. 2017 m. kiekvieną mėnesį gauti galimos sunkios Astravo AE avarijos padarinių žemėlapiai.

2017

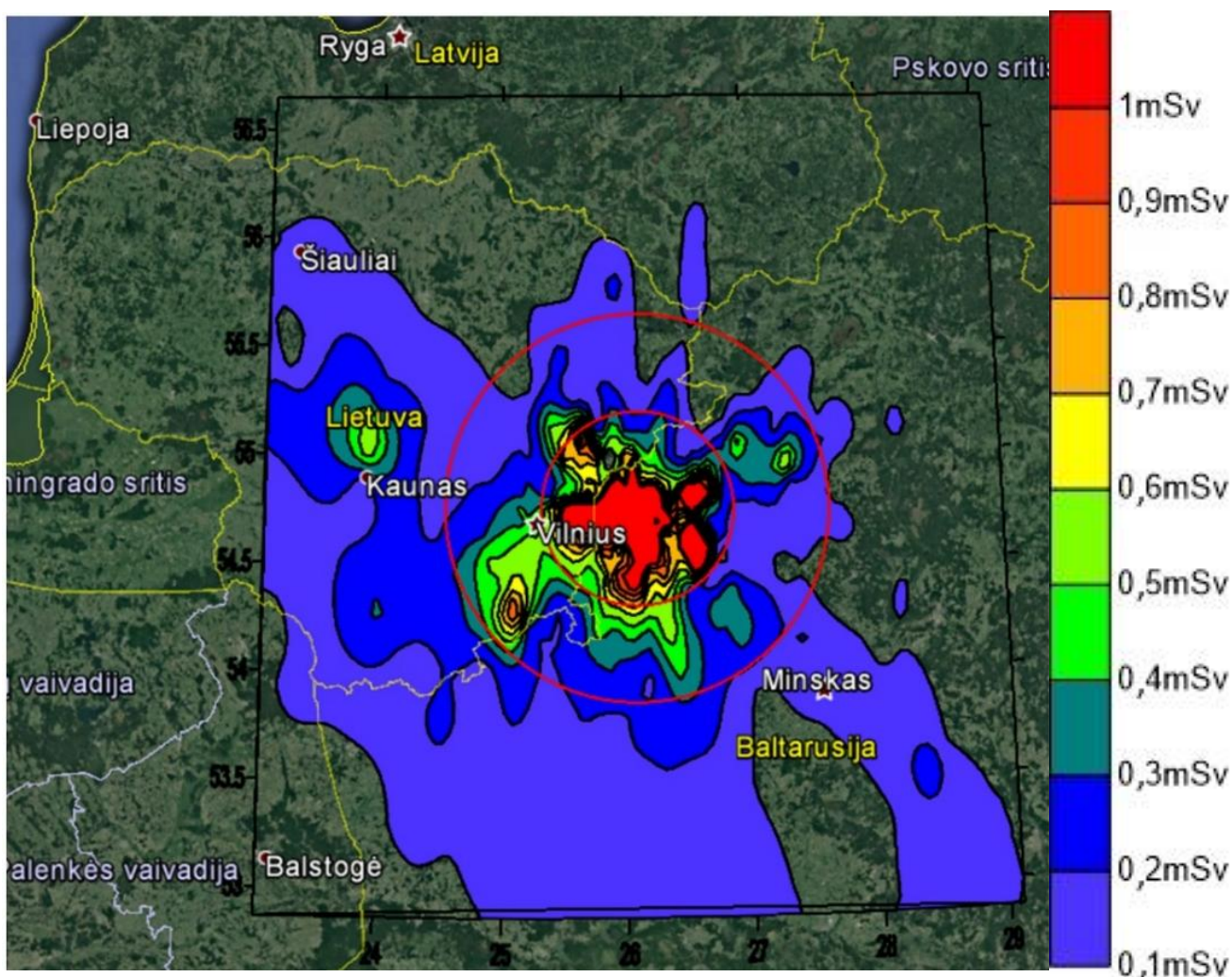


19 pav. 2017 m. kiekvieną mėnesį gauti galimos sunkiosios Kaliningrado AE avarijos padarinių žemėlapiai.

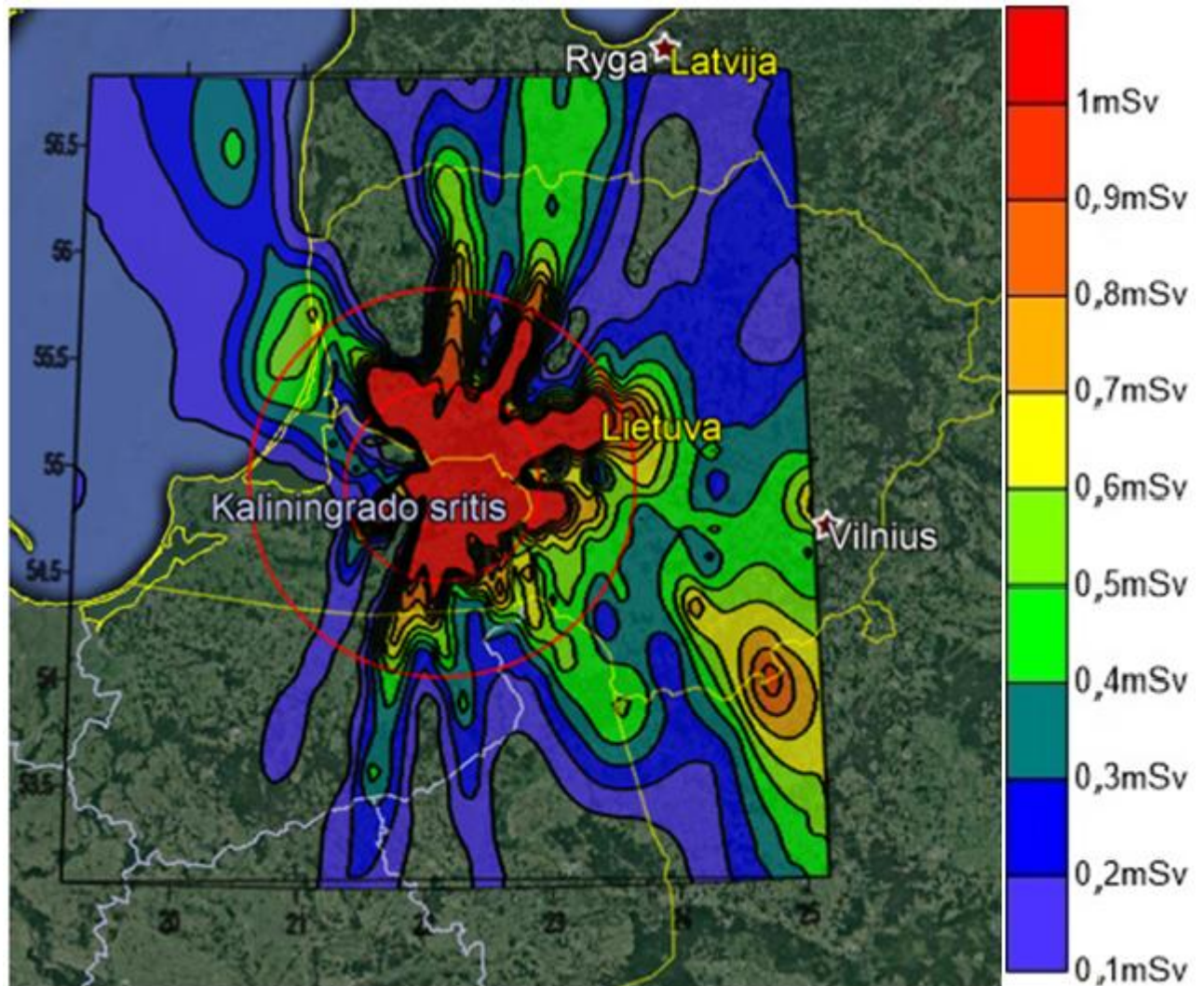
Žemėlapiuose matyti, kad per penkias dienas efektinė dozė dažnai viršija 1 mSv ribą net už 100 km ribos nuo elektrinių. Palyginimui, remiantis Lietuvos Respublikoje galiojančiais teisės aktais, gyventojai nuo visų šaltinių negali gauti didesnės nei 1 mSv per metus apšvitos, išskirtiniais atvejais apšvita gali siekti iki 5 mSv per vienerius metus su sąlyga, kad per ateinančius 5 metus

kasmet patiriama apšvita neviršys 1 mSv per metus [25]. Žemėlapiuose matyti tam tikri lokalūs apšvitos padidėjimai teritorijose toli nuo elektrinių aikštelių. Šios „dėmės“ atsiranda dėl tuo metu toje teritorijoje iškritusio lietaus. Nemažoje dalyje žemėlapių matyti, kad teršalų šleifas nuskrieja daugiau kaip 210 km.

Siekiant aiškumo 36-ių modeliavimų rezultatai kiekvienos avarijos atveju buvo aritmetiškai suvidurkinti, taip gauti 20 ir 21 pav. Reikia atkreipti dėmesį, kad šiuose žemėlapiuose skiriasi vidutinės apšvitos skalė. Maksimali vertė nėra nustatyta, tad raudona spalva, arba 1 mSv žymuo, reiškia toje teritorijoje per penkias dienas gautą 1 mSv arba didesnę apšvitą. Minimali riba yra 0,01 mSv. Astravo AE žemėlapyje matyti, kad 50 km spindulio apskrityje vyrauja didesnė kaip 0,8 mSv per penkias dienas apšvita, 100 km spinduliu nuo atominės elektrinės vyrauja didesnė kaip 0,4 mSv apšvita per penkias dienas. Kaliningrado AE žemėlapyje matyti, kad 50 km spindulio apskrityje vyrauja didesnė kaip 1 mSv per penkias dienas apšvita ypač šiaurės rytų kryptimi, 100 km spinduliu nuo atominės elektrinės vyrauja didesnė kaip 0,5 mSv apšvita per penkias dienas taip pat šiaurės rytų kryptimi.



20 pav. Suvidurkintas tikimybinis galimų apšvitos dozių žemėlapis, įvykus sunkiajai hipotetinei Astravo AE avarijai.



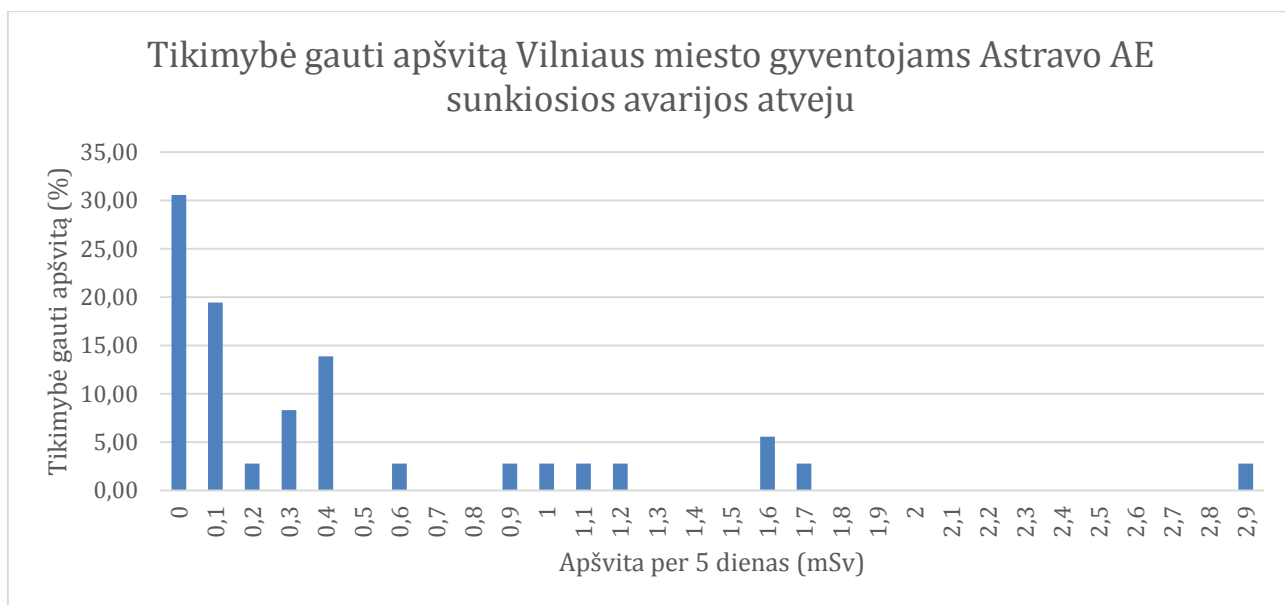
21 pav. Suvidurkintas tikimybinis galimų apšvitos dozių žemėlapis, įvykus sunkiajai hipotetinei Kaliningrado AE avarijai.

Kaliningrado AE avarijos atveju dideli miestai tokie kaip Kaunas ir Klaipėda, turintys atitinkamai 280000 ir 140000 gyventojų, yra toliau kaip 100 km nuo elektrinės aikštelės. Artimiausias miestas turintis daugiau kaip 20000 gyventojų yra Tauragė. Nuo elektrinės aikštelės ji yra 35 km atstumu. Tikėtina vidutinė dozė šiame mieste viršija 1 mSv ribą. Astravo AE avarijos atveju Vilniaus mieste, kuriame gyvena daugiau kaip 536000 gyventojų, tikėtina suvidurkinta apšvitos dozė yra tarp 0,4 mSv ir 0,5 mSv. Dėl šios priežasties rezultatai, gauti modeliuojant Astravo AE avariją, šiame darbe yra analizuojami plačiau. Reikia atsižvelgti į tai, kad suvidurkinus visus modeliavimo rezultatus didelę įtaką turi ir tie modeliuoti atvejai, kai radionuklidai nepasiekia tam tikrų teritorijų. Taip pat šiuose suvidurkintų dozių žemėlapiuose galima matyti, kad Kaliningrado AE avarijos atveju apie pusė visos taršos tenka Lietuvos teritorijai, taip yra dėl to, jog elektrinės aikštelė yra vos 11 km nuo Lietuvos sienos. Astravo AE avarijos atveju daugiau kaip

trečdalis galimos radioaktyvios taršos tenka Lietuvos teritorijai, o susiklosčius nepalankioms aplinkybėms radionuklidais gali būti stipriai užteršta daugiau kaip pusė Lietuvos teritorijos.

3.3. Tikimybė gauti apšvitą Vilniaus miesto gyventojams

Naudojant modeliavimo duomenis apskaičiuotos tikimybės Vilniaus miesto gyventojams gauti tam tikras apšvitos dozes, įvykus Astravo atominės elektrinės hipotetinei sunkiai avarijai. Šių numatomų vilniečių apšvitos dozių gavimo tikimybių pasiskirstymas pavaizduotas 22 pav.

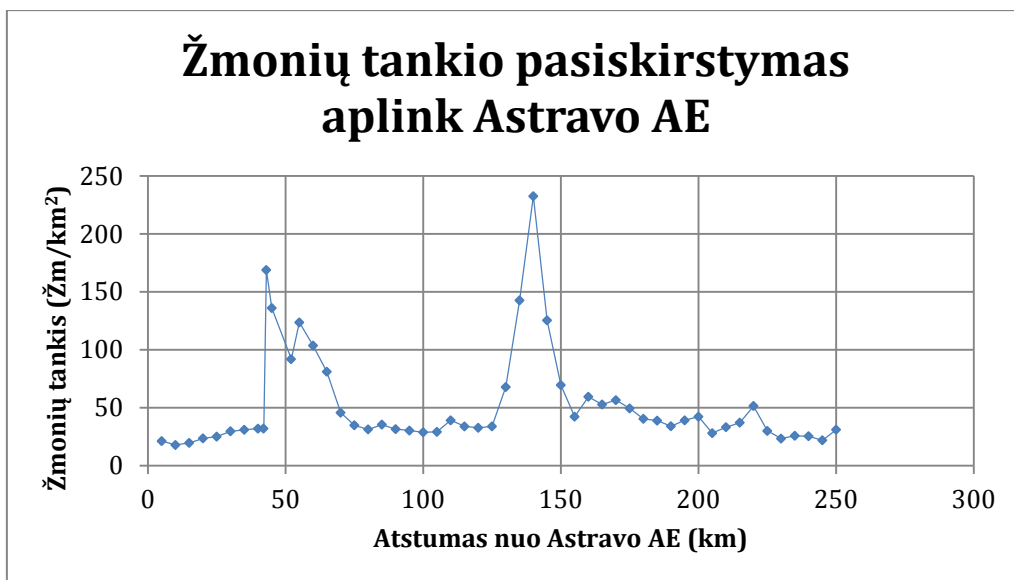


22 pav. Tikimybė gauti apšvitą Vilniaus miesto gyventojams Astravo atominės elektrinės sunkios avarijos atveju.

Horizontalioje ašyje yra apšvitos dozių intervalai (mSv) per penkias dienas po avarijos. Nulio žymuo reiškia, kad modeliuojamais atvejais jokios radioaktyvios taršos Vilniaus mieste nebuvo. Antrasis stulpelis apibūdina dozės intervalą (0 – 0,1] (nulis šiam intervalui nepriklauso, o 0,1 šiam intervalui priklauso). Vertikalioje ašyje yra tikimybė gauti atitinkamą apšvitą. Ji apskaičiuota susumavus, kiek atvejų, iš visų 36-ių modeliuojamų atvejų, apšvitos dozė patenka į pasirinktą intervalą. Didžiausia tikimybė, matoma histogramoje, yra 31 % – tai reiškia, kad yra 31 % tikimybė, jog Vilniaus miesto gyventojai nepatirs visiškai jokios apšvitos, tačiau yra 69 % tikimybė gauti apšvitą. Savaime suprantama, kad gauti mažas dozes yra didesnė tikimybė nei surinkti dideles, gyvybei pavojingas dozes. Astravo atominės elektrinės atveju, per penkias dienas Vilniaus miesto gyventojams yra 53 % tikimybė gauti apšvitą iki 1mSv ir tik 17 % tikimybė gauti didesnę nei 1 mSv dozę. Nepalankiausias sumodeliuotas scenarijus Vilniaus miesto gyventojams yra gauti 2,9 mSv vidutinę dozę per penkias dienas. Laimei tikimybė, kad susiklostys tokios

nepalankios sąlygos yra tik 2,8 %. Reikia pažymėti, kad tai yra didžiausia tikėtina vidutinė dozė, o didžiausia galima absoliuti dozė Vilniaus mieste siekia apie 30 mSv.

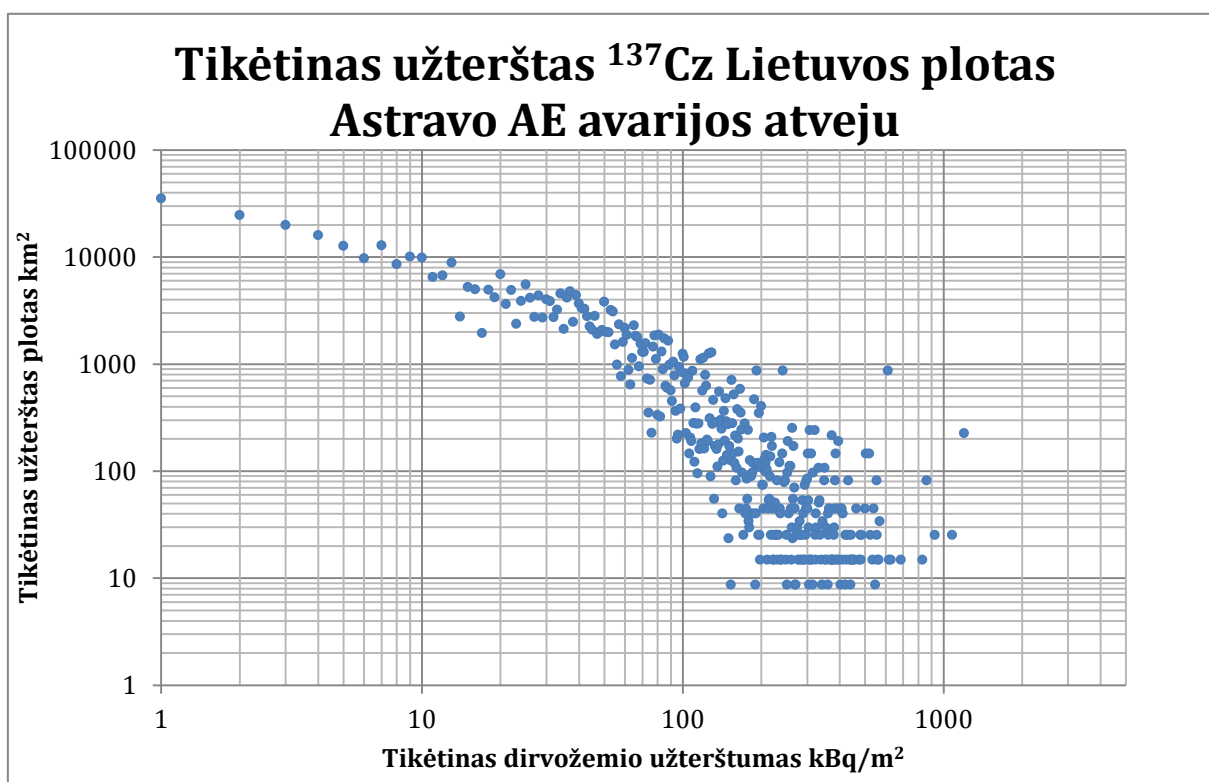
3.4. Žmonių tankis aplink Astravo AE



23 pav. Žmonių tankio pasiskirstymas aplink Astravo AE.

Astravo AE poveikio aplinkai ataskaitoje [26] rašoma, kad 25 kilometrų spinduliu aplink elektrinės aikštelę žmonių tankis tėra 24 žm/km² tačiau, kaip matoma 23 pav., vos už 40 km nuo elektrinės, žmonių tankis padidėja drąstiškai, net 6 kartus nuo 24 žm/km² iki 150 žm/km². Toks žmonių tankio padidėjimas yra dėl Vilniaus miesto, kuriame žmonių tankis yra net 1338 žm/km². Antrasis pikas matomas 23 pav. yra 140 km nuo elektrinės atstumu. Būtent tokiu atstumu nuo Astravo AE yra nutolę Minsko ir Kauno miestai.

3.5. Tikėtinas iškritų tankis



24 pav. Tikėtinas užterštas Lietuvos plotas ^{137}Cs po hipotetinės Astravo AE sunkiosios avarijos.

Astravo atominė elektrinė yra už 22 km nuo Lietuvos sienos. Įvykus hipotetinei sunkiajai avarijai būtų užteršta nemaža dalis Lietuvos teritorijos. Iš sumodeliuotų 36 avarių pasekmių buvo sukurtas 24 pav. Jame pavaizduotas sąryšis tarp galimo užteršto ploto ir taršos. Taškų koncentracija grafike parodo tikimybę, koks plotas būtų užterštas kokio ^{137}Cs aktyvumo iškritomis. Toks grafikas naudingas siekiant iš anksto nustatyti galimos avarijos mastą, nes galima matyti minimalias ir maksimalias iškritų tankio vertes. Taip pat tokiame atvaizdavime neturi įtakos konkrečios meteorologinės sąlygos. Tai reiškia, kad nėra reikalingos žinios apie konkrečias meteorologines sąlygas, norint įvertinti galimą taršą. Iš taškų koncentracijos matome, kad tikimybė, jog bus užteršta daugiau nei 10000 km^2 Lietuvos teritorijos yra labai maža. Taip pat matome, kad tikimybė jog tarša Lietuvos teritorijoje ^{137}Cs bus didesnė nei 600 kBq/m^2 taip pat yra labai maža. Palyginimui galima pasakyti, kad vidutinė ^{137}Cs koncentracija dirvožemyje Lietuvoje, remiantis išmatuotais kontroliniais bandiniais, yra $1,064 \text{ kBq/m}^2$, o didžiausia išmatuota vertė (Giruliuose) yra $4,02 \text{ kBq/m}^2$.

IŠVADOS

Atliktas galimų sunkių Astravo ir Kaliningrado AE avarijų, esant realioms meteorologinėms sąlygoms (2015 – 2017 m. laikotarpiu), radiologinių pasekmių vertinimas. Atlikti reprezentatyvių 74 galimų sunkių AE avarijų pasekmių modeliavimo ciklai ir, išanalizavus gautus duomenis, padarytos išvados:

1. Per penkias dienas po avarijos vidutinė efektinė apšvitos dozė 50 km spinduliu nuo Astravo AE būtų didesnė kaip 0,8 mSv, o 100 km spinduliu – didesnė kaip 0,4 mSv. Vilniaus mieste ir jo apylinkėse vidutinė efektinė apšvitos dozė būtų tarp 0,4 mSv ir 0,5 mSv.
2. Per penkias dienas po avarijos vidutinė efektinė apšvitos dozė 50 km spinduliu nuo Kaliningrado AE būtų didesnė kaip 1 mSv, o 100 km spinduliu – didesnė kaip 0,5 mSv, ypač šiaurės rytų kryptimi.
3. Įvykus Astravo AE sunkiajai avarijai, atsirastų 31 % tikimybė, kad Vilniaus miesto gyventojai nepatirs visiškai jokios apšvitos, ir 69 % tikimybė gauti apšvitą nelygią nuliui. Taip pat būtų 53 % tikimybė gauti apšvitą iki 1 mSv ir tik 17 % tikimybė gauti didesnę nei 1 mSv efektinę apšvitos dozę per penkias dienas.
4. Pajūryje ir pietvakariniame Lietuvos krašte ^{137}Cs paviršinio aktyvumo tankis yra didžiausias Lietuvoje. Išmatuotas Giruliuose paviršinio aktyvumo tankis siekia $4020 \pm 202 \text{ Bq/m}^2$. Bendrai visų bandinių iškritų tankio aritmetinis vidurkis yra 1066 Bq/m^2 .

Potencialaus atominių elektrinių keliamo radiologinio pavojaus Lietuvai vertinimas

Branduolinė energija yra viena iš ekonomiškiausių ir švariausių energijos rūšių. Tačiau nelaimingi atsitikimai atominėse elektrinėse gali sukelti labai skaudžius padarinius. Astravo AE šiuo metu yra statoma Lietuvos pasienyje, vos 50 km nuo Vilniaus miesto, o Kaliningrado AE statybos yra įpusėjusios, tačiau laikinai sustabdytos. Tampa aktualu įvertinti tokių objektų keliamą pavojų ir jį pagrįsti apskaičiuojant galimą apšvitą Lietuvos gyventojams nelaimės atveju. Šio darbo tikslas yra įvertinti aplink Lietuvą statomų atominių elektrinių keliamą radiologinį pavojų. Su PC Cosyma programa, kuri skaičiavimuose naudoja Gausinio pasiskirstymo šleife modelį, yra modeliuojamos hipotetinės Astravo ir Kaliningrado atominių elektrinių avarijos ir įvertinamos pasekmės Lietuvos teritorijai. Yra naudojami trijų metų (2015 m., 2016 m., 2017 m.) meteorologiniai duomenys ir atliekami 74 modeliavimo ciklai, trunkantys 20 – 30 min. Atlikus skaičiavimus ir nubraižius žemėlapius matyti, kad 50 km spinduliu nuo šių elektrinių aikštelių vyrauja didesnė kaip 0,8 mSv, o 100 km spinduliu – didesnė kaip 0,5 mSv efektinė apšvitos dozė. Vilniaus mieste efektinė apšvitos dozė yra tarp 0,4 mSv ir 0,5 mSv per penkias dienas. Įvykus Astravo AE avarijai, Vilniaus miesto gyventojams atsirastų 31 % tikimybė nepatirti visiškai jokios apšvitos ir 69 % tikimybė gauti apšvitą nelygią nuliui. Taip pat būtų 53 % tikimybė gauti apšvitą iki 1 mSv ir tik 17 % tikimybė gauti didesnę nei 1 mSv lygiavertę apšvitos dozę per penkias dienas. Nepalankiausias sumodeliuotas scenarijus Vilniaus miesto gyventojams yra gauti 2,9 mSv lygiavertę dozę. Tačiau tikimybė, kad susiklostys tokios nepalankios sąlygos yra tik 2,8 %.

Summary

Aistis Jurkonis

Evaluation of potential radiological risk posed by nuclear power plants to Lithuania

Nuclear energy is one of the most economical and environmentally friendly energy source in our days. However, the disasters in nuclear power plants cause severe consequences. Astravets' nuclear power plant is being constructed near Lithuanian border, only 50 km from Vilnius, while Kaliningrad's nuclear power plant constructions is temporarily stopped. It is important to estimate the risk of these nuclear objects and identify exposure doses for citizens of Lithuania. The aim of this work is to estimate radiological impact of nuclear power plants which are constructed around Lithuania.

The PC COSYMA codes use the Gaussian model to calculate atmospheric dispersion on radioactive material. Three years historical meteorological data are used for calculations and 74 simulation cycles, each lasting 20 – 30 minutes, was made. After drawing maps it became clear that 50 km radius from the plants is more than 0,8 mSv dose and in the radius of 100 km more than 0,5 mSv radiation dose. Exposure dose in Vilnius is between 0,4 mSv and 0,5 mSv within five days after accident in Astravets nuclear power plant. The probability for Vilnius' citizens to have zero exposure is 31 %, and the probability that exposure would be greater than zero is 69 %. Also, it would be 53 % chance to get exposure smaller than 1 mSv and only 17 % chance to get greater exposure than 1 mSv within five days. The most unwanted simulated scenario for Vilnius' citizens is to get a 2,9 mSv dose. However, the probability is only 2,8%.

Literatūra

- [1] Long-term dispersion modelling: assessment of atmospheric transport and deposition patterns from nuclear risk sites in euro-arctic region. A. Mahura Danish Meteorological Institute, Copenhagen, Denmark Institute of the Northern Environmental Problems, Kola Science Center, Apatity, Russia Ecole Centrale de Nantes, France. A. Baklanov, J. H. Sorensen Danish Meteorological Institute, Copenhagen, Denmark. Article in ResearchGate, January 2006 m.
- [2] Gianni Petrageli, Nuclear safety. Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford, 2006 m.
- [3] International atomic energy agency. Actions to protect the public in an Emergency due to severe conditions at a light water reactor. Date effective 2013 May.
- [4] J. Brandt, J. H. Christensen, and L. M. Frohn, Modelling transport and deposition of caesium and iodine from the Chernobyl accident using the DREAM, Atmospheric Chemistry and Physics (ACP) journal, 2, p. 397–417, 2002. Prieiga per internetą:
<http://www.atmos-chem-phys.net/2/397/2002/acp-2-397-2002.pdf> (žiūrėta 2019-05-22)
- [5] R. E. Burns, A. I. Apostoaei et al., Iodine - 131 releases from radioactive lanthanum processing at the X-10 site in Oak Ridge, Tennessee (1944-1956) – an assessment quantities released off-site radiation doses and potential excess risk of thyroid cancer APPENDICES, Reports of the Oak Ridge dose reconstruction, Vol. 1A, The Report of Project Task 1, 1999. Prieiga per internetą:
<http://www.lahdra.org/pubs/OakRidge/onea.pdf> (žiūrėta 2019-03-03)
- [6] Assessment of potential human health and environmental impacts of a nuclear power plant (NPP) based on atmospheric dispersion modeling. Abubakar Sadiq Aliyu, Ahmad Termizi Ramli, Muneer Aziz Saleh Department of Physics, Faculty of Science, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 Skudai, Johor, Malaysia; *Atmosfera* 28(1), 13-26 (2015)
- [7] Dr. Ashok Kumar, Basic Meteorological Process. Straipsnis internete. Prieiga per internetą:
<http://www.eng.utoledo.edu/~akumar/IAP1/NEWMET.htm> (žiūrėta 2019-04-25)
- [8] VIII Radiation Physics & Protection Conference, 13-15 November 2006, Beni Sueif - Fayoum, Egypt, Estimation of Seasonal Atmospheric Stability and Mixing Height by Using Different Schemes Khaled S. M. Essa ; Mokhtar M. Embaby ; A. M. Kozae; Fawzia Mubarak and Ibrahim Kamel. Prieiga per internetą:
http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/092/38092987.pdf (žiūrėta 2019-04-22)
- [9] Atmospheric stability cklasifications. Straipsnis internete. Prieiga per internetą:
http://www.eng.utoledo.edu/aprg/courses/iap/text/met/9_atmos_classify.html (žiūrėta 2019-04-22)

- [10] Asian Journal of Applied Sciences (ISSN: 2321 – 0893) Volume 04 – Issue 02, April 2016 Asian Online Journals (www.ajouronline.com) 422 Dynamics of Wind Strength and Wind Direction on Air Pollution Dispersion M. L. Akinyemi¹, M. E. Emetere^{2*} and S. A. Akinwumi³ 1,2,3 Covenant University Canaanland (Ota, Nigeria)
- [11] A Recommended Pasquill-Gifford Stability Classification Method for Safety Basis Atmospheric Dispersion Modeling at SRS C. H. Hunter, March 2012, Savannah River National Laboratory Savannah River Nuclear Solutions.
- [12] Calculation and Re-Calculation of 60-Minute Sigma Theta and Stability, Dale Paynter, Operations Management Group.
- [13] Atmospheric science letters Atmos. Sci. Let. 6: 90–96 (2005) Published online 27 May 2005 in Wiley Inter Science (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/asl.94, Comparison of some sigma schemes for estimation of air pollutant dispersion in moderate and low winds Khaled S. M. Essa, Fawzia Mubarak and Sanaa Abu Khadra. Prieiga per internetą: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/asl.94> (žiūrėta 2019-04-22)
- [14] Hrvatski meteorološki dasopis, 39, 3-14, 2004, Prediction of stability and mixing height in the complex orography, Meteorological and Hydrological Service Grid 3, 10000 Zagreb, Croatia, Amela Jerieevic, Kornelija Špoler Čanic and Sonja Vidič.
- [15] Performance Test of the Pasquill Stability, Classification Scheme, Hillary Lin Chapman, University of Wisconsin Milwaukee, 2017 May.
- [16] AERMOD Deposition Algorithms – Science Document (Revised Draft Argonne National Laboratory (ANL) report (Wesely, et al., 2001). Prieiga į internetą: http://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aer_scid.pdf (žiūrėta 2019-01-12)
- [17] Methodology for evaluation of possible consequences of accidental atmospheric releases of hazardous matter. A. Mahura, A. Baklanov and J. Havskov Sørensen Danish Meteorological Institute Lyngbyvej 100 DK-2100 Copenhagen, Denmark Institute of the Northern Environmental Problems Kola Science Center Apatity, RUS-184200 Russia. Radiation Protection Dosimetry Vol. 103, No. 2, pp. 131–139 (2003) Nuclear Technology Publishing
- [18] Steven G. Homann, Fernando Aluzzi, HotSpot Health Physics Codes Version 3.0 User's Guide. National Atmospheric Release Advisory Center, Lawrence Livermore National Laboratory, CA 94550, 2014. Prieiga per internetą: <https://narac.llnl.gov/content/assets/docs/HotSpot-UserGuide-3-0.pdf> (žiūrėta 2019-03-01)
- [19] Commission of the European Communities, National Radiological Protection Board and Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, PC COSYMA Version 1.0 User Guide, Publication no. EUR 14917 EN, 1993. Prieiga per internetą: <http://bookshop.europa.eu/en/pc-cosyma-version-1.0-user-guide-pbEUNA14917/downloads/EU-NA-14917-EN->

C/EUNA14917ENC_001.pdf;pgid=y8dIS7GUWMdSR0EAlMEUUsWb0000kSSfM_mu;sid=ZPIKbv6RbHFKbrFh8g_UyZy0KZpUHLPyeos=?FileName=EUNA14917ENC_001.pdf&SKU=EUNA14917ENC_PDF& (žiūrėta 2019-03-02)

[20] J. A. Jones, P et al., National Radiological Protection Board, I. Hasemann at el., Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik, RADIATION PROTECTION, PC Cosyma (Version 2): An accident consequence assessment package for use on a PC, final report, EUR 16239 EN, 1996. Prieiga per internetą:

<https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6db57183-cc01-11e6-ad7c-01aa75ed71a1>(žiūrėta 2019-01-13)

[21] Maceika E., Radionuklidų sklaidos aplinkoje modeliavimas. Vaizdinė paskaitų medžiaga, 2015 m.

[22] Meteorological data, WeatherSpark weather website. Prieiga per internetą: <https://weatherspark.com/#!/dashboard;ws=33808> (žiūrėta 2018-11-19)

[23] Bukantis A. Atmosferos reiškinių stebėjimai. Vilnius: VU leidykla, 2009 m. p. 17-25

[24] D. Butkus, Jonizuojančioji spinduliuotė aplinkoje. Vilnius: Technika, 2006 m.

[25] Radiacinės saugos centras. Gyventojų apšvita ir radiacinė sauga. Prieiga per internetą: <http://www.rsc.lt/index.php/pageid/746/print/1> (žiūrėta 2019-03-03)

[26] Statement on possible environmental impact of Belarusian NPP. Prieiga per internetą: <http://www.belaes.by/dadvfiles/ovosen.pdf> (žiūrėta 2019-05-19)