

Radionuklidų sklaida iš kristalinėse uolienose įrengto geologinio kapinyno RBMK-1500 panaudotam branduoliniam kurui laidoti

4. Radionuklidų sklaida tolimojo lauko aplinkoje

Asta Brazauskaitė,

Povilas Poškas

*Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinės inžinerijos problemų
laboratorija, Breslaujos g. 3,
LT-44403 Kaunas
El. paštas: asta@mail.lei.lt,
poskas@mail.lei.lt*

Galima radionuklidų sklaida iš geologinių panaudoto branduolinio kuro kapinyne ir jos sąlygojama žmonių apšvita yra vienas svarbiausių aspektų vertinant tokių kapinyne saugą. Panaudoto branduolinio kuro kapinyne įrengimui analizuojamos įvairios geologinės formacijos tokios kaip akmens druskos, granitai ir panašios kristalinės uolienos, molingos uolienos, vulkaninis tufas, bazaltas. Šiuo metu kaip potencialios uolienos kapinyne įrengimui labiausiai iširtos kristalinės uolienos, tokios kaip granitai ir gneisai.

Šiame darbe aptarti pagrindiniai radionuklidų sklaidą kristalinėse uolienose lemiantys ir sąlygojantys procesai, tokie kaip požeminio vandens geofiltracija, sorbcija, makrodispersija ir pan. Taip pat pateikiami preliminarūs radionuklidų sklaidos modelinio kapinyne RBMK-1500 panaudotam branduoliniam kurui laidoti tolimojo lauko aplinkoje vertinimo rezultatai. Radionuklidų sklaidai kristalinėse uolienose vertinti buvo naudota susikertančių plyšių koncepcija (angl. *Discrete Channel Network Model*), kuri realizuota kompiuterinėje programoje CHAN3D (Švedija).

Raktažodžiai: laidojimas kristalinėse uolienose, RBMK-1500 panaudotas branduolinis kuras, radionuklidų sklaida, konteinerio su defektu scenarijus, tolimojo lauko aplinka, susikertančių plyšių koncepcija

1. ĮVADAS

Galima radionuklidų sklaida iš geologinių panaudoto branduolinio kuro kapinyne ir jos sąlygojama žmonių apšvita yra vienas svarbiausių aspektų vertinant tokių kapinyne saugą. Panaudoto branduolinio kuro kapinyne įrengimui analizuojamos įvairios geologinės formacijos tokios kaip akmens druskos, granitai ir panašios kristalinės uolienos, molingos uolienos, vulkaninis tufas, bazaltas. Šiuo metu kaip potencialios uolienos kapinyne įrengimui labiausiai iširtos kristalinės uolienos, tokios kaip granitai ir gneisai.

Geologinio kapinyne kristalinėse uolienose Lietuvoje RBMK-1500 panaudoto branduolinio kuro (PBK) laidoti bendrinė koncepcija, kurios prototipu pasirinkta KBS-3 koncepcija išvystyta PBK laidojimui Švedijoje, pateikta pirmame šios serijos straipsnyje [1]. Antrame serijos straipsnyje [2] pateiktos kapinyne saugos vertinimui svarbių (reikšmingų) radionuklidų identifikavimo metodologijos bei šių radionuklidų, laidojant RBMK-1500 panaudotą branduolinį kurą, atrinkimo pagrindimas, o trečiajame serijos straipsnyje [3] aptarta preliminarai radionuklidų sklaidos kapinyne artimojo lauko aplinkoje analizė

konteinerio su defektu scenarijaus atveju. Pagrindinis veiksnys, lemiantis radionuklidų sklaidą kristalinėse uolienose, yra požeminio vandens tekėjimas, kai radionuklidai advekcijos būdu plyšiais tekančiu vandeniu pernešami iki paviršinių vandens telkinių arba gruntinio vandens horizonto. Šiame darbe aptarti pagrindiniai radionuklidų sklaidą kristalinėse uolienose lemiantys ir sąlygojantys procesai, tokie kaip požeminio vandens geofiltracija, sorbcija, makrodispersija ir pan. Radionuklidų sklaidai vertinti buvo naudojama susikertančių plyšių (kanalų) koncepcija (realizuota kompiuterinėje programoje CHAN3D (SKB, Švedija)). Remiantis šia koncepcija radionuklidų pernaša vyksta kanalais, kuriuos sudaro susikertantys plyšiai ir kuriuose vandens tekėjimas priklauso nuo kiekvienam plyšiui atsitiktinai priskirto hidrodinaminio laidumo bei požeminio vandens spūdzio pasiskirstymo sistemoje. Naudojant kompiuterinę programą CHAN3D sprendžiama lygčių, aprašančių požeminio vandens masės balansą susikertančių plyšių tinkle esant nagrinėjamos kraštinėms sąlygoms, sistema. Analizuojant radionuklidų sklaidą taikomas dalelės sekimo metodas, kai įvertinama analitiniu būdu gauta dalelės pernašos trukmė atskirame plyšyje bei dalelių pernašos tikimybinis pobūdis.

2. PROCESAI TOLIMOJO LAUKO APLINKOJE

Atliekant kapinyno saugos, radionuklidų sklaidos vertinimus, laidojimo sistemą galima suskirstyti į tris posistemas [4]:

- artimojo lauko sritį;
- geosferą (tolimojo lauko sritis);
- biosferą.

Artimojo lauko sąvoka apima radioaktyviųjų atliekų pakuočių, kapinyną kartu su atliekų konteinerius supančiais inžineriniais barjeriais ir kapinyno užsandaravimo elementais, taip pat apima dalį kapinyną supančių uolienų (sutrikdyta zona). Tolimojo lauko sąvoka apima natūralių barjerų sistemą (visumą): kapinyną supančias uolienas, kurių savybės nepakito dėl kapinyno įrengimo, ir aplink kapinyną esančias uolienas supančias geologines formacijas. Biosferos sąvoka apima orą, vandenį, dirvožemį, augalus, gyvūnus ir žmones. Pasklisdami ore, vandenyje, dirvožemyje ir nuosėdose radionuklidai gali paveikti augalus, gyvūnus ir žmones [5].

Radionuklidų sklaidą tolimojo lauko aplinkoje sąlygojančius procesus galima skirstyti į procesus, lemiančius dalelių pernašą, ir procesus, lemiančius dalelių retardaciją. Medžiagos, patekusios į požeminį vandenį, migracijos procesams uolienose priskiriami procesai [6]:

- advekinė (geofiltracinė) medžiagos pernaša, sąlygojama hidrodinaminio spūdzio gradiento, geofiltracijos greičių lauko ir efektyviojo poringumo (plyšiuotumo);
- molekulinė difuzija, atsirandanti dėl skysčių koncentracijos gradiento;
- išilginė hidrodispersija – medžiagos sklaida dėl skirtingų atskirų srauto srovelių judėjimo greičių, kai bendra srauto kryptis lieka ta pati; ši procesą nulemia nevienodo dydžio uolienos poros ir plyšiai;
- skersinė dispersija – medžiagos sklaida įvairiomis kryptimis dėl uolienos nevienalytiškumo.

Be to, dar yra skiriama mikrodispersija ir makrodispersija. Pirmosios atveju geofiltracinės aplinkos heterogeniškumas (nevienalytiškumas) medžiagos sklaidai įtakos praktiškai neturi, todėl galima laikyti, kad ta aplinka yra homogeninė (vienalytė). Antrosios atveju uolienos nevienalytiškumas turi įtakos medžiagos sklaidai. Makrodispersija būdingiausia vadinamojo tvarkingo nevienalytiškumo sluoksniuotoms sistemoms, kai medžiaga sklinda gana laidžiais sluoksniais advekcijos būdu ir kartu skverbiasi į mažai laidžius tarp sluoksnius, kur vyrauja molekulinė difuzija, veikiama skersinės dispersijos. Taip pat makrodispersija pasireiškia heterogeninėje (nevienalytėje) aplinkoje dvejopo talpumo uolienose (kai mažai laidžius blokus skiria gerai laidūs plyšiai).

Migracijos procesų metu vyksta ir vandenyje esančios medžiagos fizinė bei cheminė transformacija ir tos medžiagos bei vandens sąveika su vandenį talpinančiomis uolienomis, taip pat sorbcija ir jonų mainai, tirpimas, biocheminiai procesai, radioaktyvusis skilimas. Šie procesai mažina medžiagos pernašos greitį, keičia jos koncentraciją.

Kristalinės uolienos – tai mineralų (cheminis junginys, turintis specifinę sudėtį ir kristalinę struktūrą) ar jų fragmentų visuma. Tarp mineralų esti įvairaus dydžio ertmės (poros), kurios susisiekdamos gali sudaryti vandeniui pralaidžius plyšius. Tokiu būdu plyšiuotose uolienose, kokios gali būti ir kristalinio pamato uolienos, požeminis vanduo teka daugiausia jose esan-

čiais plyšiais. Uolienų plyšiuotumas (santykinis plyšių tūris) paprastai neviršija 2% ir dažniausiai sudaro procento dalis [6]. Tokiose uolienose radionuklidai gali sklirti kartu su tekančiu požeminiu vandeniu advekcijos būdu. Tačiau tarp plyšių esančios uolienos turi mikroplyšelius, kuriuose požeminis vanduo nejuda. Radionuklidai gali difunduoti į šiuos mikroplyšelius, o šis reiškinys vadinamas difuzija į uolienas. Dėl difuzijos į uolienas radionuklidai difunduoja į uolienos mikroplyšiuose esantį nejudantį vandenį, tokiu būdu jie yra užlaikomi (retardacija) ir sklinda lėčiau nei kartu su tekančiu vandeniu. Radionuklidų sklaidos atžvilgiu svarbūs yra radionuklidų sorbcijos ant uolienos porų paviršiaus ir plyšių paviršiaus procesai. Sorbcijos sąvoka apima daug įvairių sulaikymo procesų ir mechanizmų, dėl kurių radionuklidai sukimba su uolienų paviršiumi ar kitų medžiagų paviršiumi, pvz., molio mineralų, kurie gali būti ant plyšių paviršiaus. Sorbcija uolienose, dalelėms difundavus į uolienas, gali būti svarbesnė nei sorbcija ant plyšių paviršiaus, nes uolienose yra didesnis sorbcijai reikalingas paviršiaus plotas. Difuzijos į uolienas bei sorbcijos ant plyšio paviršiaus atžvilgiu labai svarbus uolienų drėkinamas paviršius, t. y. su plyšiu tekančiu vandeniu besiliečianti uolienų dalis. Radionuklidų sorbcijos ir tirpimo vandenyje savybės labai priklauso nuo redukcijos–oksidacijos sąlygų, rūgštingumo (pH) ir kompleksinių reagentų buvimo. Šie veiksniai tiesiogiai veikia radionuklidų mobilumą. Sorbuojami radionuklidai gali būti ir neužlaikomi ir sklirti vandens tekėjimo greičiu, jei jie prisijungia prie požeminiame vandenyje esančių koloidinių dalelių.

Jei radionuklidai yra ištirpę vandenyje ir nesąveikauja su aplinka, jų pernešimo greitį nulemia požeminio vandens tekėjimo (geofiltracijos) greitis. Jei radionuklidai gali difunduoti į uolienos matricą ir sąveikauti su porų paviršiumi, tai reikš didelį radionuklidų vėlinimą (retardaciją), ir jų sklaidos greitį iš esmės lems plyšių geometrija ir vandens tekėjimo greitis, taip pat uolienų sorbcinės ir difuzinės savybės.

3. RADIONUKLIDŲ SKLAIDOS TOLIMOJO LAUKO APLINKOJE VERTINIMO METODOLOGIJA

Pagrindinis radionuklidų sklaidos plyšiuotose uolienose mechanizmas yra jų sklaida dėl požeminio vandens tekėjimo plyšiais. Požeminio vandens geofiltracijai ir radionuklidų sklaidai įvertinti galimi keli priartėjimai. Pirmu atveju plyšiuotos uolienos laikomos ištisine aplinka (angl. continuum approach), kuri hidrodinaminio požiūriu yra lygiavertė poringai aplinkai. Šiuo atveju vandens geofiltracijai plyšiuotoje aplinkoje įvertinti taikomas žinomas Darsi dėsnis. Vientisos aplinkos prielaida gali būti naudojama, jei nagrinėjamas toks uolienos tūris, kuris yra didelis palyginus su atskirų porų dydžiu, tačiau mažas palyginus su uolienų tūriu, kuriame tikėtini dideli uolienos makroskopinių savybių svyravimai (angl. variations). Jei vientisos aplinkos prielaidos taikyti negalima, reikalinga įvertinti požeminio vandens tekėjimą atskirais plyšiais ar jų grupėmis (nevientisos aplinkos prielaida, angl. discontinuum approach). Vandens tekėjimui plyšiuose apibūdinti reikalingi duomenys apie plyšių orientaciją, jų tankį, susijungimo laipsnį, plyšio apertūros dydį, plyšio paviršiaus lygumą. Be to, jei plyšio apertūra didelė, vandens tekėjimas plyšiu gali būti labiau turbulentinis nei laminarinis ir Darsi dėsnio taikyti nebegalima, uolienų hidrodinaminis laidumas (filtracijos koeficientas) gali kisti priklausomai nuo įtempimų uolienose bei vandens

slėgio pokyčių. Šiuo atveju požeminio vandens tekėjimui plyšyje taikomas dėsnis, kuriuo remiantis esant spūdzio gradientui vandens srautas per plyšį yra proporcingas plyšio apertūrai trečiuoju laipsniu (angl. *cubic law*). Šiame darbe požeminio vandens tekėjimui įvertinti naudota susikertančių plyšių koncepcija [7].

Remiantis minėta metodologija laikoma, kad požeminis vanduo teka kanalais, kuriuos sudaro susikertantys plyšiai. 1 paveiksle parodytas modelyje naudojamo tinklo dalies conceptualus vaizdas.

Kiekvienam tinklo plyšiui atsitiktinai parenkama (priskiriama) hidrodinaminio laidumo (filtracijos koeficiento) reikšmė iš hidrodinaminio laidumo pasiskirstymo dėsnio, kuris nustatomas atliekant nagrinėjamos plyšiuotos formacijos hidrologinius tyrimus.

Požeminio vandens geofiltracija aprašoma Darsi dėsniumi, pagal kurį požeminis vanduo teka dėl spūdzių gradiento, o požeminio vandens srauto dydis priklauso nuo aplinkos bei vandens savybių, ir kuris požeminiam vandeniui tekant plyšiu gali būti išreiškiamas [7]:

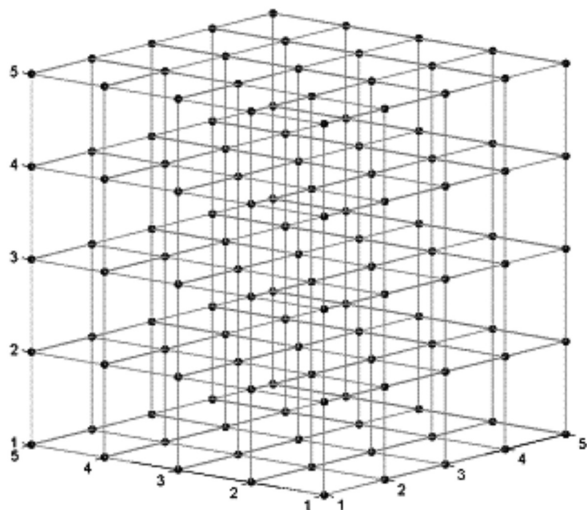
$$q_{ij} = C_{ij} (H_j - H_i); \quad (1)$$

čia q_{ij} – požeminio vandens srautas mazgus i ir j jungiančiame plyšyje (m^3/s), C_{ij} – plyšio laidumas (m^2/s), H_j ir H_i – spūdis (m) šiuose mazguose. Be to, kiekviename plyšių susikirtimo taške – mazge i , nuostoviosios geofiltracijos sąlygomis galioja:

$$\sum_j q_{ij} = 0 \text{ visiems } i. \quad (2)$$

Tai reiškia, kad visas į mazgą įtekančio vandens srautas lygus ištekančiam srautui minėtomis sąlygomis. Išsprendus šių lygčių sistemą gaunama hidrodinaminio spūdzio reikšmė kiekviename mazge, esant nurodytoms kraštinėms sąlygoms (spūdzio vertėms modeliuojamos sistemos ribose). Nustačius kiekviename mazge spūdzio reikšmes, įvertinama požeminio vandens geofiltracija tarp atskirų kanalų naudojant pirmąją lygtį.

Radionuklidų sklaida vertinama naudojant dalelių sekimo techniką. Į plyšių susikirtimo vietą (mazgą) patekusios dalelės pasiskirsto plyšiuose pagal tikimybę proporcingą vandens srautui kiekviename plyšyje. Kiekviena dalelė, judanti modeliuojamoje sistemoje, yra sekama atskirai.



1 pav. Plyšių susikirtimo taškai (mazgai) ir kanalų tinklą sudarantys plyšiai

Dalelės advekinis pernešimas plyšyje, sorbcija ant plyšio paviršiaus ir difuzija į uolienas aprašomi masės tvermės dėsnio diferencialine forma, kuris neatsižvelgiant į radioaktyvųjų skilimą, užrašomas taip:

$$\left(1 + \frac{K_a}{b}\right) \frac{\partial C_f}{\partial t} = -\frac{q}{2Wb} \frac{\partial C_f}{\partial x} + \frac{D_e}{b} \frac{\partial C_p}{\partial z} \Big|_{z=0}; \quad (3)$$

čia C_f – nagrinėjamų dalelių koncentracija kanale esančiame vandenyje (mol/m^3), C_p – nagrinėjamų dalelių koncentracija uolienos porose esančiame vandenyje (mol/m^3), K_a – paviršinės sorbcijos koeficientas ($1/m$), b – pusė plyšio apertūros (t. y. $b = \delta/2$) (m), W – plyšio plotis (m), D_e – efektyvios difuzijos koeficientas (m^2/s), q – advekinis vandens srautas plyšyje (m^3/s). Kairėje lygties pusėje esantis narys aprašo dalelių koncentracijos vandenyje, esančiame plyšyje, kitimą dalelėms sorbuojantis ant plyšio paviršiaus. Dešinėje lygties pusėje esantys nariai įvertina advekinį pernešimą ir difuziją į uolienas.

Masės tvermės dėsnis difuzinei radionuklidų sklaidai ir sorbcijai uolienose įvertinti:

$$K_d \rho_p \frac{\partial C_p}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C_p}{\partial z^2}; \quad (4)$$

čia K_d – sorbcijos uolienoje koeficientas (m^3/kg).

Išsprendus masės tvermės dėsnį išreiškiančias lygtis esant momentiniam koncentracijos pokyčiui plyšio pradžioje, gaunamas analitinis sprendinys, išreiškiantis dalelių koncentracijos pokytį plyšio išėjime [7]:

$$\frac{C(t)}{C_0} = \begin{cases} 0 & \text{kai } t \leq R \cdot t_w \\ \operatorname{erfc} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{D_e K_d \rho_p}{t - R \cdot t_w} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{FWS}{q} \right] & \text{kai } t > R \cdot t_w \end{cases}; \quad (5)$$

čia FWS – vandens drėkinamas paviršius (m^2/m^3), t – dalelės judėjimo kanale laikas (s), t_w – vandens judėjimo kanale laikas (s). Parametras R , yra retardacijos (vėlinimo) koeficientas vykstant dalelių sorbcijai ant kanalo paviršiaus. Kiekvienos dalelės judėjimo kanale (plyšyje) laikui įvertinti atsitiktinai parenkamas skaičius iš intervalo $[0, 1]$ ir apskaičiuojamas dalelės judėjimo kanale laikas išsprendus (3) lygtį t atžvilgiu.

3.1. Konceptualus modelis

Kristalinio pamato uolienos, slūgsančios pietinėje Lietuvos dalyje 210–700 m gylyje, buvo įvardytos kaip potenciali geologinė aplinka PBK kapinyno įrengimui atsižvelgiant į kristalinio pamato uolienų slūgsojimo gylį [8]. Tuo tarpu didžiojoje Lietuvos dalyje pamato slūgsojimo gylis viršija 700 m, o vakarinėje dalyje siekia 2300 m [8]. Kristalinio pamato uolienos Lietuvoje slūgso po nuosėdinėmis uolienomis, kurios sudaro vandeningų ir vandensparinių sluoksnių sistemą.

Atsižvelgiant į kristalinio pamato uolienų slūgsojimo sąlygas ir rekomenduojamą geologinės formacijos aplink kapinyną storį buvo sudarytas konceptualus modelis radionuklidų sklaidos kristalinėse uolienose analizei atlikti. Šiame darbe priimamas konservatyvesnis atvejis, kad kapinynas įrengtas kristalinio pamato uolienose požeminio vandens iškrovos srityje (trumpiausias kelias iki požeminio vandens iškrovos vietos (upės, ežero ir pan.)) ir analizuojama tolesnė radionuklidų sklaida kristalinėse uolienose. Sudarant konceptualų modelį priimtos pagrindinės prielaidos:

- Kapinynas yra įrengtas kristalinio pamato uolienose mažiausiai 100 m gylyje nuo kristalinio pamato viršaus (virš kristalinio pamato yra nuosėdinių uolienų sluoksniai).

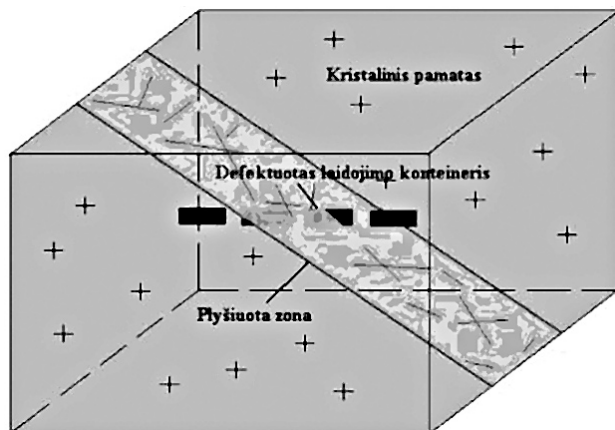
- Modeliuojamos uolienos srities su joje patalpintu laidojimo konteineriu, turinčiu defektą konteinerio sienelėje, dydis yra apie 200 m × 200 m × 200 m.

- Nesant detalių duomenų apie spūdzio pasiskirstymą modeliuojamos srities ribose, priimta, kad tarp modeliuojamos srities apatinės ir viršutinės plokštumų yra pastovus spūdzio gradientas.

Laidojant PBK konteinerių patalpinimo didelio plyšiuotumo zonose bus išvengta, tačiau negalima paneigti, jog ateityje nesusidarys situacija, kai aplink laidojimo konteinerį su defektu sienelėje bus didesnio laidumo plyšiuota zona (dėl įvairių veiksnių galimo poveikio, pvz., žemės drebėjimas, ilgalaikė klimato kaita ir pan.). Didesnio laidumo zonos buvimo įtakos tendencijoms skirtingų radionuklidų sklaidai įvertinti sklaidos modeliavimas atliktas dviem atvejais:

- Radionuklidai patenka į susikertančių plyšių, kurių laidumas pasiskirstęs pagal lognormalinį dėsnį, sistemą;

- Radionuklidai patenka į didesnio laidumo zoną atitinkančius plyšius, didesnio pralaidumo plyšiuotos zonos pasvirimas priimtas 45 laipsniai (2 pav.).



2 pav. Tolimojo lauko aplinkos modelis

Radionuklidų sklaidos plyšiuotoje uolienoje vertinimo metu buvo priimtos tokios pagrindinės prielaidos [3]:

- Į plyšiuotas uolienas patenka srautas radionuklidų, kurie nebuvo visiškai sulaukyti inžineriniuose kapinyno barjeruose (artimojo lauko aplinkoje) konteinerio su defektu scenarijaus atveju.

- Iš 1400 Lietuvos PBK laidojimo reikmėms reikalingų konteinerių vienas konteineris praeis patikrą turėdamas 1 mm² dydžio defektą sienelėje;

- Praėjus 200 tūkst. metų po kapinyno uždarymo pradinis defektas padidėja nuo 1 · 10⁻⁶ m² (1 mm²) iki 1 · 10⁻² m² (1 dm²) dydžio.

- Praėjus 200 tūkst. metų po kapinyno uždarymo požeminis vanduo ima kontaktuoti su PBK matrica.

Analizuojant radionuklidų sklaidą, virš kristalinio pamato esančių nuosėdinių uolienų įtaka radionuklidų srautui į biosferą nebuvo vertinta (konservatyvus vertinimas), nes norint tai įvertinti reikalingi konkrečiai vietai būdingi duomenys apie fizikines sluoksnių savybes, struktūrą, fizikines ir chemines sąlygas. Galimam radionuklidų poveikiui žmogui (sąlygojamos apšvitos) įvertinti buvo naudojami nagrinėjamo radionuklido dozės koeficientai, kurie atitinka apšvitos dozę, kurią sąlygotų į šulinio vandenį patenkantis 1 Bq per metus nagrinėjamo radionuklido srautas. Šulinio vanduo gali būti naudojamas gėrimui buityje bei gyvuliams girdyti, auginamoms daržovėms laistyti. Įvertintos potencialios apšvitos trasos yra:

- Išorinė apšvita nuo užteršto laistomo daržo dirvožemio,
- Apšvita įkvėpus daržo dirbimo metu pakeltas dulkes su jose esančiais radionuklidais,

- Apšvita vartojant:

- vandenį,
- šulinio vandenį geriančių galvijų pieną ir mėsą,
- lapines ir šakniavaisines daržoves, užaugintas šulinio vandeniu laistomame dirvožemyje,
- dirvožemį kartu su nepakankamai nuplautomis daržovėmis.

3.2. Pagrindiniai duomenys

Radionuklidų sklaidai uolienoje įvertinti buvo naudojama kompiuterinė programa CHAN3D (Švedija). Skaičiavimams buvo naudoti turimi duomenys iš pietrytinio Lietuvos regiono, o nesant

Lentelė. Radionuklidų sklaidai vertinti tolimojo lauko aplinkoje naudoti pagrindiniai duomenys

Parametras	Reikšmė (reikšmių intervalas) iš lietuviškų šaltinių	Priimta reikšmė	Šaltinis
Spūdzio gradientas %	–*	0,3	[12]**
Hidrodinaminis laidumas m/s	2,31 · 10 ⁻⁷ – 4,37 · 10 ⁻⁵	***	[10]
Standartinis nuokrypis log10 skalėje, –	–*	1,5	[11]**
Specifinis vandens drėkinamas paviršiaus plotas m ² /m ³	–*	1,5	[12]**
Uolienos tankis kg/m ³	2600–2780	2672	[10]
Uolienos poringumas m ³ /m ³	0,2–1,42	8 · 10 ⁻³	[10]
Uolienų plyšiuotumas %	–*	0,1	[11]**
Vidutinis kanalo ilgis m	–*	3	[12]
Plyšiuotos zonos dydis m	–*	9	
Plyšiuotos zonos plotis m	–*	18	

* Duomenys neprieinami.

** Priimti Švedijos kristalinėms uolienoms Beberg vietovėje būdingi duomenys.

*** Minimali reikšmė priimta kaip mažai plyšiuotos uolienos laidumo reikšmė ir maksimali reikšmė priimta kaip didesnio laidumo plyšiuotos zonos laidumo reikšmė. Hidrodinaminio laidumo reikšmės yra pakankamai didelės, palyginus su Suomijoje atliktų tyrimų rezultatais (uolienų hidrodinaminis laidumas yra 1 · 10⁻¹⁰–1 · 10⁻⁹ m/s dydžio). Išsamesnių duomenų tikimasi tik atlikus tyrimus pietrytinėje Lietuvos dalyje. Tuo tarpu šiam darbe panaudoti turimi konservatyvūs duomenys.

duomenų naudoti kitoms kristalinėms uolienoms būdingi parametrai. Kadangi nuo kapinyno aplinkos sąlygų (pH, druskingumas ir kt.) priklauso radionuklidų difuzijos, sorbcijos koeficientų (ypač K_d) uolienose reikšmės, kurios nėra nustatytos Lietuvos atveju, priimta, kad šių parametru reikšmės bus panašios į nustatytas parametru reikšmes kitose šalyse esančiose kristalinėse uolienose [7, 9]. Kadangi išsamūs radionuklidų sklaidos kartu su koloidinėmis dalelėmis tyrimai Lietuvoje dar neatlikti, buvo priimta prielaida, kad koloidinių dalelių koncentracija požeminiame vandenyje yra maža, todėl remiantis apibendrintais skaičiavimų rezultatais [11] radionuklidų sklaida kartu su koloidais gali būti nevertinama.

Radionuklidų sklaidai vertinti tolumo lauko aplinkoje naudoti pagrindiniai duomenys bei nuorodos į jų šaltinius pateikti lentelėje.

4. REZULTATŲ APTARIMAS

Radionuklidų sklaidos artimojo lauko aplinkoje modeliavimas parodė, kad ne visi nagrinėti radionuklidai patenka į plyšių tekantį vandenį [3]. Tai lemia PBK matricos irimo greitis, ribotas radionuklidų tirpimas požeminiame vandenyje, radionuklidų sorbcija ant bentonito barjero medžiagos porų paviršiaus, radioaktyvusis skilimas. Suminių radionuklidų srautą iš artimojo lauko aplinkos pradžioje nulemia radionuklidai ^{59}Ni ir ^{129}I , vėliau vyrauja radionuklidai ^{226}Ra . ^{226}Ra yra dukterinis ^{238}U skilimo grandinės radionuklidai ir yra mobilus nei jo motininiai radionuklidai [3].

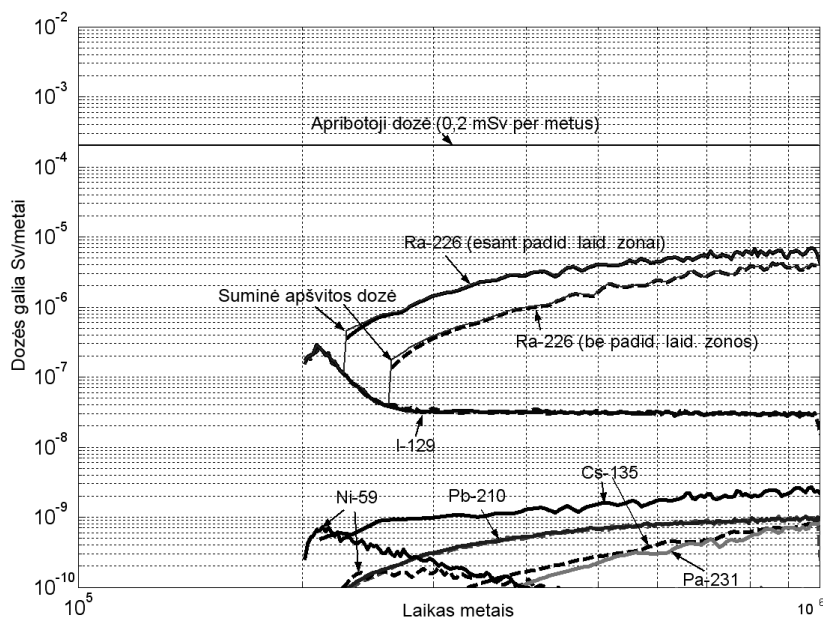
Radionuklidų sklaidos tolumo lauko aplinkoje vertinimai buvo atlikti kiekvieno vertinimo metu kiekvienam susikertančių plyšių tinklą sudarančiam plyšiui atsitiktinai parenkant laidumo reikšmę iš jo skirstinio ir tokiu būdu atspindint atsitiktinį pralaidžių plyšių pasiskirstymo pobūdį. Analizė parodė, kad radionuklidų sklaidos kristalinėse uolienose rezultatai nesikeičia jau po trijų realizacijų, todėl buvo apsiribota penkiomis realizacijomis. Tokio mažo realizacijų skaičiaus pakanka pagrindinėms radionuklidų sklaidos tendencijoms gauti dėl to, kad nagrinėjamos sąlygomis dėl gana didelio hidrodinaminio laidumo, o tuo labiau dėl didesnio pralaidumo zonos buvimo, radionuklidai iš laidoji-

mo konteinerio nepasklinda plačiai aplink konteinerį ir sparčiai pasiekia modeliuojamos srities kraštą (geosferos–biosferos).

Radionuklidų sklaidos kristalinėse uolienose rezultatai, išreikšti kaip apšvitos dozės galia (apšvita, kurią sąlygotų kapinyno kristalinėse uolienose pasklidę radionuklidai ir iškart patekę į šulinio vandenį, kuris naudojamas buityje, ūkyje), pateikti 3 paveiksle, kai nėra didesnio pralaidumo plyšiuotos zonos ir jai esant.

Rezultatų analizė parodė, kad radionuklidų srautas tolumo lauko aplinkoje yra panašus į srautą iš artimojo lauko, tačiau kai kuriems radionuklidams pastebimas srauto sumažėjimas bei vėlinimas (^{59}Ni , ^{94}Nb , ^{135}Cs , ^{226}Ra). Srauto sumažėjimui ir vėlinimui įtakos turėjo radionuklidų sorbcija ant plyšių paviršiaus, difuzija į uolienas ir sorbcija ant uolienose esančių porų paviršiaus. Difuzija į uolieną didžiausią įtaką turėjo ^{135}Cs radionuklido sklaidai kristalinėse uolienose. Iš gautų rezultatų matyti, kad didesnio pralaidumo zonos buvimas kapinyno aplinkoje veikė stipriau su aplinka sąveikaujančių radionuklidų sklaidą. Esant intensyvesnei geofiltracijai radionuklidų sąveika su plyšių paviršiumi, uolienų porų paviršiumi yra trumpesnė, todėl daugiau dalelių praeina kristalines uolienas ir nėra užlaikomi jose. Tai rodo tokių radionuklidų kaip ^{59}Ni , ^{135}Cs didesnė sąlygojama apšvita esant didesnio pralaidumo plyšiuotai zonai. Tuo tarpu nesorbujamo jodo (^{129}I) srautas išlieka nepakitęs, šis radionuklidai nėra sulaikomas kristalinėse uolienose, o silpnai sorbuojamo ^{226}Ra ($K_d = 0,02 \text{ m}^3/\text{kg}$) srautas kristalinėse uolienose ir sąlygojama apšvita paveikiamas nežymiai. Esant aplink PBK konteinerį apie 10^2 kartų didesnio laidumo plyšiams, nežymiai pakitęs ^{226}Ra srautas reiškia, kad maksimalus srautas ir sąlygojama apšvita priklauso jau ne nuo hidrologinių sąlygų plyšiuotose uolienose, tačiau nuo radionuklidų srauto iš artimojo lauko aplinkos, kuris priklauso nuo artimajame lauke esančių sąlygų bei vykstančių procesų. PBK konteinerio buvimas didelio pralaidumo plyšiuotoje zonoje nėra tikėtina situacija, nes laidojimo konteinerių patalpinimo kapinyne metu plyšiuotų zonų bus išvengta. Tačiau negalima paneigti, kad tokia situacija nesudarys ateityje (pvz., dėl ilgalaikių klimato pokyčių).

Palyginus kristalines uolienas praėjusių radionuklidų sąlygojamos apšvitos dozės su apribotąja doze, kuri remiantis



3 pav. Kristalines uolienas praėjusių radionuklidų sąlygojamos apšvitos dozės ir suminės dozės galių priklausomybės nuo laiko esant (ištininė linija) ir nesant (punktirinė linija) didesnio pralaidumo plyšiuotajai zonai

Lietuvos Respublikos norminiais dokumentais yra 0,2 mSv per metus, tikėtina, kad apribotoji dozė 0,2 mSv per metus nebūtų viršyta milijono metų laikotarpiu po kapinyno uždarymo ir būtų daugiau nei 10 kartų mažesnė nei apribotoji dozė. Pradžioje suminę apšvitos dozę sąlygotų nesorbuojamas radionuklidai ^{129}I , o praėjus 300 tūkst. metų jau vyrautų radionuklidai ^{226}Ra .

Radionuklidų sklaidą kristalinėse uolienose lemiančių ir sąlygojančių procesų įvertinimas, sklaidos modeliavimas, naudojant susikertančių plyšių koncepciją, bei atlikti preliminarūs radionuklidų sklaidos vertinimai svarbūs analizuojant panaudoto branduolinio kuro laidojimo Lietuvoje galimybes, rengiant rekomendacijas dėl tolesnių prioritetinių tyrimų. Vertinant PBK laidojimo Lietuvoje galimybes ateityje reikės išanalizuoti galimą radionuklidų sklaidą bei jos sąlygojamą apšvitą kitų laidojimo sistemos evoliucijos scenarijų atveju (ilgalaikės klimato kaitos, žemės drebėjimo, žmonių įsibrovimo ir kitų scenarijų atveju) bei įvertinant konkrečiai vietai būdingus duomenis, atlikti parametrų jautrumo, rezultatų patikimumo analizę.

5. IŠVADOS

Atlikti radionuklidų sklaidos iš RBMK-1500 panaudoto branduolinio kuro kapinyno kristalinėse uolienose vertinimai parodė, kad:

- radionuklidų srautas iš tolimojo lauko aplinkos yra panašus į srautą iš artimojo lauko, tačiau kai kuriems (dėl sorbcijos ir difuzijos) radionuklidams pastebimas srauto sumažėjimas bei vėlinimas (^{59}Ni , ^{94}Nb , ^{135}Cs , ^{226}Ra);
- intensyvesnė geofiltracija (dėl plyšiuotos zonos aplink konteinerių didesnio laidumo) nepakeitė (^{129}I atveju) arba veikė nežymiai (^{226}Ra atveju) vyraujančių radionuklidų suminės apšvitos dozę, didesnę įtaką jų srautui iš kapinyno turi sąlygos kapinyno artimojo lauko aplinkoje;
- tikėtina (konservatyvūs vertinimai), kad radionuklidų sklaidos iš RBMK-1500 PBK kapinyno kristalinėse uolienose sąlygota gyventojų apšvitos dozė neviršytų apribotosios dozės (0,2 mSv per metus) milijono metų laikotarpyje po kapinyno uždarymo ir būtų daugiau nei 10 kartų mažesnė nei apribotoji dozė;
- pradžioje suminę apšvitos dozę sąlygotų nesorbuojamas radionuklidai ^{129}I , o praėjus 300 tūkst. metų jau vyrautų radionuklidai ^{226}Ra .

Gauta 2007 07 21
Priimta 2008 01 10

Literatūra

1. Brazauskaitė A., Poškas P. Radionuklidų sklaida iš kristalinėse uolienose įrengto geologinio kapinyno RBMK-1500 panaudotam branduoliniam kurui laidoti. 1. Kapinyno koncepcija // Energetika. 2005. Nr. 3. P. 70–78.
2. Brazauskaitė A., Poškas P. Radionuklidų sklaida iš kristalinėse uolienose įrengto geologinio kapinyno RBMK-1500 panaudotam branduoliniam kurui laidoti. 2. Geologinio kapinyno saugos vertinimui svarbių radionuklidų identifikavimas // Energetika. 2006. Nr. 2. P. 47–56.
3. Brazauskaitė A., Poškas P. Radionuklidų sklaida iš kristalinėse uolienose įrengto geologinio kapinyno RBMK-1500 panaudotam branduoliniam kurui laidoti. 3. Radionuklidų sklaida artimojo lauko aplinkoje // Energetika. 2007. Nr. 1. P. 15–22.
4. International Atomic Energy Agency. Deep Underground Disposal of Radioactive Wastes: Near-Field Effects. Technical reports series No. 251, IAEA, Vienna, 1985. 60 p.
5. International Atomic Energy Agency. Model formulation, implementation and data for safety assessment or near surface disposal facilities // Working document: ISAM/MDWG/WD01, Version 0.4, Modelling and Data Working Group, 2001. 192 p.
6. Dobkevičius M. Hidrogeodinamika. Vilnius: Enciklopedija, 2001. 358 p.
7. Crawford J., Moreno L. The Channel Network Model CHAN3D v2.0 [Beta version]. Royal Institute of Technology, 2003.
8. Investigation of possibilities to dispose of spent nuclear fuel in Lithuania: a model case. Vol. 1. Suitability of geological environment in Lithuania for disposal of spent nuclear fuel, 2005.
9. Carbol P., Engkvist I. Compilation of Radionuclide Sorption Coefficients for Performance Assessment. SKB report R-97-13, 1997.
10. Мотуза Г., Марфин С. и др. Отчет о поисках месторождения гранита, пригодного для изготовления высокопрочного щебня в Варенском районе Лит. ССР. Вильнюс, 1980, 3255 с.
11. SR 97. Deep Repository for Spent Nuclear Fuel. SKB Technical Report TR-99-06, Main Report, Vol. II.
12. Crawford J., Moreno L., Neretnieks I. Determination of the flow-wetted surface in fractured media // Journal of Contaminant Hydrology. 2002. Vol. 61. P. 361–3669.

Asta Brazauskaitė, Povilas Poškas

RADIONUCLIDE MIGRATION FROM THE GEOLOGICAL REPOSITORY OF THE RBMK-1500 SPENT NUCLEAR FUEL IN CRYSTALLINE ROCKS

4. RADIONUCLIDE RELEASE FROM THE FAR FIELD

Summary

Modeling of the potential radionuclide release from the geological repositories for spent nuclear fuel disposal and potential human exposure are among the most important parts while performing the safety assessment of the repository. The rock types currently under investigation as a potential repository host rocks are salts, granite and similar crystalline rocks, argillaceous rocks, tuff and basalt. The best investigated host rocks to date are crystalline rocks, primarily granite and gneiss.

In this paper, the main processes that determine and influence radionuclide release in the far field (groundwater flow, sorption, dispersion, etc.) are discussed. Preliminary results of modeling radionuclide release from the far field of the repository of the RBMK-1500 spent nuclear fuel are presented. For radionuclide migration in the far field, the concept of discrete channel network implemented in the computer code CHAN3D (Sweden) was used.

Key words: disposal in crystalline rocks, RBMK-1500 spent nuclear fuel, radionuclide release, canister defect scenario, far field, discrete channel network concept

Аста Бразаускайте, Повилас Пошкас

**МИГРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ
ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОГИЛЬНИКА В
КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАССИВАХ ДЛЯ
ЗАХОРОНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО
ТОПЛИВА РБМК-1500
4. МИГРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ
МОГИЛЬНИКА**

Резюме

Моделирование потенциальной миграции радионуклидов из геологического могильника для захоронения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и оценка радиоактивного облучения людей являются одной из самых важных частей оценки критериев безопасности такого могильника. В настоящее время разные геологические слои

(соль, гранит и кристаллические массивы, глина, вулканический туф) исследуются как потенциальные формации для геологического могильника. Наиболее исследованными слоями являются кристаллические массивы, в основном гранит и гнейс.

В настоящей статье обсуждены процессы, определяющие и влияющие на миграцию радионуклидов в дальней зоне могильника (течение подземной воды, сорбция, дисперсия и т. д.). Представлены результаты оценки миграции радионуклидов в этой зоне могильника для захоронения ОЯТ РБМК-1500. Для оценки миграции радионуклидов использована (в компьютерном коде CHAN3D, Швеция) концепция сети пересекающихся трещин.

Ключевые слова: захоронение в кристаллических массивах, отработавшее ядерное топливо РБМК-1500, миграция радионуклидов, сценарий дефектного контейнера, дальняя зона могильника, концепция сети пересекающихся трещин