



⁹⁰Sr KAUPIMOSI PAPRASTOSIOS PUŠIES (*PINUS SYLVESTRIS* L.) MEDIENOJE TYRIMAS

Donatas Butkus¹, Ingrida Pliopaitė Bataitienė², Tautvydas Bataitis³

Aplinkos apsaugos katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,

Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva

El. paštas ^{1,3}aak@ap.vgtu.lt; ²ingrida@ap.vgtu.lt

Įteikta 2007 06 06, priimta 2007 06 12

Santrauka. Pateikiami ⁹⁰Sr medienoje tyrimo rezultatai, pagal kuriuos jis kinta nuo (0,03±0,01) Bq/kg iki (2,32±0,34) Bq/kg. Autoriai siūlo ⁹⁰Sr sukauptam pušies medienoje kiekiui modeliuoti naudoti *FORM* modelį. Vidutinis skirtumas tarp tyrimo ir modelio rezultatų yra 13 %. Norint įvertinti visą sukauptą ⁹⁰Sr medyje kiekį, taikomas savitojo aktyvumo integralų sumavimo metodas, prieš tai nustačius ⁹⁰Sr savitojo aktyvumo ir medžio biomasės prieaugio ryšio funkciją. Pagal pasiūlytą modelį įvertinta, kad per 1950–2000 m. pušis sukauptė 620 Bq. Darbe yra įvertintas ⁹⁰Sr pernašos iš dirvožemio į paprastosios pušies medieną koeficientas. 1950–2000 m. laikotarpiu jis kito nuo (2,0±1,0) · 10⁻⁴ m²/kg iki (9,7±1,0) · 10⁻⁴ m²/kg.

Reikšminiai žodžiai: ⁹⁰Sr, radionuklidų migracija, sistema dirvožemis–medis mediena, *Pinus sylvestris* L., radionuklidų savitasis aktyvumas medienoje.

1. Įvadas

Pagrindiniai dirbtinės kilmės radioaktyviųjų medžiagų aplinkoje šaltiniai yra branduolinio ginklo bandymai ir atominių elektrinių veikla, ypač jų avarijos. Radionuklidų elgsena aplinkoje priklauso nuo radioaktyviųjų medžiagų ir aplinkos komponentų fizikinių, cheminių savybių. Dirvožemyje radionuklidai migruoja nevienodu greičiu – tai priklauso nuo radionuklido ir dirvožemio savybių (Yvanov ir kt. 1997).

Analizuojant Lietuvos teritorijos užtaršą ⁹⁰Sr, literatūroje yra išskiriami iki Černobylio atominės elektrinės (ČAE) avarijos ir po ČAE avarijos laikotarpiai. ⁹⁰Sr užtaršai yra būdingas dėmėtumas. Šio radionuklido užtarša atsirado dėl branduolinio kuro ciklo pramonės ir dėl branduolinių avarių pasekmių (Lietuvos... 1997–1998; Василенко, И. Я., Василенко, О. И. 2002; Strontium-90 2002). Literatūroje minima, kad po ČAE avarijos Lietuvos dirvožemio užtarša ⁹⁰Sr padidėjo nežymiai.

⁹⁰Sr pusėjimo trukmė – 29,12 metų. Šis radionuklidas yra β spinduliuotės, kurio skilimo produktas – ⁹⁰Y, o stabilusis analogas – Ca (Lietuvos... 1997–1998; Василенко, И. Я. и Василенко, О. И. 2002; Botezatu ir Jacob 1999; Strontium-90 2006). ⁹⁰Sr yra osteotropinis, biologiškai pavojingas radionuklidas, kuris didžiausią pavojų kelia patekęs į organizmą, nes sukelia jo apšvitą iš vidaus. ⁹⁰Sr poveikis priklauso nuo apšvitės dozės, kuri formuojama ilgą laiką (Батурич 1997; Nedveckaitė 2004).

⁹⁰Sr į medį patenka iš atmosferos per fotosintezę vykdančius organus arba iš dirvožemio per augalo šaknų sistemą kartu su maistinėmis medžiagomis (Батурич 1997; Марčiulionienė ir kt. 2001; Марčiulionienė ir Ki-

ponas 1999; Kanapickas ir Raupelienė 2004). ⁹⁰Sr absorbcija per fotosintetinančius organus tesudaro mažiau nei 10 % viso augalo pasisavinimo. Tačiau Čistagolovkos vietovėje atlikti tyrimai rodo, kad per šaknis radionuklidų įsisavinimas gali būti net iki 200 kartų didesnis nei per lapus, o Polecko vietovėje šis santykis tesiekia 8 kartus (Kanapickas ir Raupelienė 2004). Globaliose radioaktyviosiose iškritose ⁹⁰Sr daugeliu atvejų yra vandenyje tirpus, o dirvoje jis yra judrios formos. ⁹⁰Sr, patekęs į aplinką, gali dalyvauti augalų, gyvūnų medžiagų apykaitoje kaip Ca analogas (Батурич 1997; Malek ir kt. 2000). ⁹⁰Sr migracijai įtakos turi dirvožemio tipas, jo pH terpė, drėgmė, Ca ir organinių medžiagų kiekis (Lietuvos... 1997–1998; Марčiulionienė ir Kiponas 1999). ⁹⁰Sr fiksacija augale priklauso nuo ⁹⁰Sr dispersinių formų ir augalo rūšinių ypatybių. 3–4 mėnesius per metus oro temperatūra laikosi žemiau 0 °C. Ilgiausiai šis laikotarpis trunka Rytų Lietuvoje, o trumpiausiai pajūryje (Laurinavičius ir kt. 2007). Tais laikotarpiais sulėtėja medžiuose maistinių medžiagų apykaita ir įsisavinimas, o kartu mažėja radionuklidų savitasis aktyvumas atitinkamoje medžio rievėje. Globalios užtaršos ⁹⁰Sr fiksacijos augaluose koeficientas gali siekti 25 %. ⁹⁰Sr įsiurbimas (difundavimas) į augalą priklauso nuo dalelių tirpumo vandenyje ir augalo rūšies, nuo ⁹⁰Sr biologinio prieinamumo augalams, agrocheminių dirvožemio savybių ir nuo apykaitinio Ca kiekio dirvožemyje (Батурич 1997).

Japonijoje (Tsukui ir Takao vietovės) tiriant ⁹⁰Sr savituosius aktyvumus kedro (*Cryptomeria*) metinėse rievėse, nustatyta, kad Takao vietovės kedro medienoje ⁹⁰Sr savitasis aktyvumas kinta nuo (0,18±0,12) iki (1,7±0,1) Bq/kg sausos medienos, o žievėje (1,8±0,7) Bq/kg sauso-

sios masės, o Tsukui vietovės kedro medienoje – nuo (0,41±0,15) iki (1,11±0,07) Bq/kg sausos medienos, o žievėje – (4,81±0,33) Bq/kg sausosios masės (Радиоактивное... 2004).

Skirtingai nei ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr pasižymi nedideliu radioluoju judriu tarp metinių rėvių. Todėl, remiantis ⁹⁰Sr kaupimosi plikasėklių augalų metinėse rėvėse rezultatais, galima vertinti radioaktyviąją aplinkos užtaršą, buvusią praeityje. ⁹⁰Sr sukauptas kiekis metinėse rėvėse atspindi tiek lokalias, tiek globalias ⁹⁰Sr iškritas (Радиоактивное... 2004; Chigira ir kt. 1988). ⁹⁰Sr kaupimuisi medyje turi įtakos ir medžio amžius (Kagava ir kt. 2002).

Darbo tikslas – nustatyti ⁹⁰Sr savitąjį aktyvumą pušies (*Pinus sylvestris* L.) medienoje ir įvertinti jo kaitą per 50 medžio augimo metų.

2. ⁹⁰Sr savitojo aktyvumo paprastosios pušies medienoje nustatymo metodika

Tiriamosios pušies augavietė yra ⁹⁰Sr užtaršos pietinėje Lietuvos zonoje. Šioje vietovėje dirvožemis yra vidutiniškai nujaurėjęs smulkus smėlis, vidutinio rūgštingumo (5,5 pH) (Buzinny ir kt. 2000; Butkus ir Beinavičius 2002). Atlikus radiocheminę dirvožemio bandinio analizę pagal LAND 64-2005 aprašytą metodiką, nustatyta, kad ⁹⁰Sr dirvožemio paviršinis tankis, pušies (*Pinus sylvestris* L.) augavietėje Alytaus rajone, remiantis 2006 metų tyrimo rezultatais, buvo 2 478 Bq/m² (Bataitis ir Butkus 2006).

Kamieno bandiniai pagal metus buvo skaldomi į skales, kurios buvo džiovinamos ir deginamos krosnyje 480 °C temperatūroje. Gautos anglis buvo susmulkinamos ir bandinys paruošiamas gama spektrometrinei analizei (Butkus ir Beinavičius 2002).

Radiocheminis ⁹⁰Sr koncentravimas bandiniuose atliekamas pagal LAND 64-2005 aprašytą tvarką, taikant formules (1–4). ⁹⁰Sr savitasis aktyvumas apskaičiuotas pagal (LAND 64-2005; Bataitis ir Butkus 2006) darbe pateiktą metodiką.

⁹⁰Sr radiocheminio išskyrimo efektyvumas nustatomas pagal žinomą pridėto į bandinį itrio oksido aktyvumą. Itrio cheminė išėiga apskaičiuojama pagal formulę (LAND 64-2005; Bataitis ir Butkus 2006):

$$Y = \frac{(a-b) \cdot 177,80}{603,8 \cdot 0,010} \cdot 100 \% = 29,45(a-b) \cdot 100 \% , \quad (1)$$

čia Y – itrio cheminė išėiga, %; a – lėkštelės svoris su itrio oksalatu, g; b – tuščios lėkštelės svoris, g; 177,8 – itrio molekulinė masė oksalate, g; 603,8 – itrio oksalato (Y₂(C₂O₄)₃ × 9H₂O) molekulinė masė, g; 0,010 – pridėto į mėginį itrio nešiklio kiekis, g.

⁹⁰Sr aktyvumas mėginyje apskaičiuojamas pagal formulę (LAND 64-2005; Bataitis ir Butkus 2006):

$$A = \frac{(N - N_f) \cdot A_k}{N_k - N_f} , \quad (2)$$

čia A – aktyvumas, Bq; N – bandinio impulsų skaičiavimo intensyvumas, imp./s; N_f – fono impulsų skaičiavimo intensyvumas, imp./s; N_k – kalibravimo šaltinio impulsų skaičiavimo intensyvumas, imp./s; A_k – kalibravimo šaltinio aktyvumas, Bq.

⁹⁰Sr savitasis aktyvumas mėginyje apskaičiuojamas pagal formulę (LAND 64-2005; Bataitis ir Butkus 2006):

$$A_{Sr-90} = \frac{A}{Y \cdot m} , \quad (3)$$

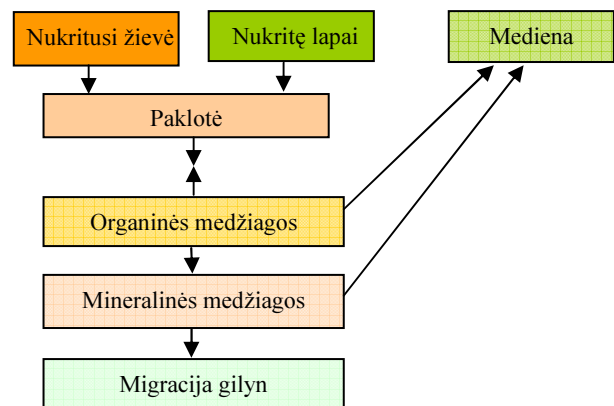
čia A_{Sr-90} – ⁹⁰Sr savitasis aktyvumas mėginyje, Bq/kg; A – aktyvumas mėginyje, Bq; Y – ⁹⁰Y cheminė išėiga; m – mėginio masė, kg.

Standartinė mėginio aktyvumo paklaida apskaičiuojama pagal formulę (LAND 64-2005; Bataitis ir Butkus 2006):

$$Sc = \frac{\sqrt{\frac{N}{t} + \frac{N_0}{t_0}}}{E \cdot \exp(-\lambda \Delta t)} , \quad (4)$$

čia Sc – standartinis aktyvumo nuokrypis, Bq/mėg.; N – mėginio impulsų skaičiavimo intensyvumas, imp./s; N₀ – fono impulsų skaičiavimo intensyvumas, imp./s; t – impulsų skaičiavimo laikas, s; t₀ – foninės spinduliuotės impulsų skaičiavimo laikas, s; E – registravimo efektyvumas, imp./s/Bq; λ – ⁹⁰Y skilimo konstanta, 0,0108 h⁻¹; Δt – laiko tarpas tarp ⁹⁰Y išskyrimo ir matavimo laiko, h.

⁹⁰Sr migracija sistemoje dirvožemis–pušies mediena įvertinta ne tik atlikus eksperimentinius tyrimus, bet ir naudojant IAEA (Tarptautinė atominės energijos agentūra) siūlomą FORM (Forest model) scenarijų (modelį). Šio modelio principinė schema pateikiama 1 pav. (Modeling... 2002).



1 pav. Principinė FORM modelio schema (Modeling... 2002)

Fig. 1. Principled scheme of FORM model (Modeling... 2002)

FORM modelio matematinį pagrindą sudaro (5)–(7) matematinės išraiškos (Modeling... 2002). Medienos prieaugis per laiką t įvertinamas pagal (5) ir (6) formules:

$$G = 0,0375 \cdot \text{Metai}(\text{medžio})^{2,12} , \quad (5)$$

kai medžio metai ≤ 60,

$$G = 220 + (\text{Metai}(\text{medžio}) - 60) \cdot 11,9 , \quad (6)$$

kai medžio metai > 60.

Savitasis aktyvumas medienoje apskaičiuojamas pagal (7) formulę:

$$A_{(mediena,t)} = \frac{A_{(dirvo\z. sl.)} \cdot PF \cdot dt \cdot dG + A_{(mediena, t-dt)} \cdot G_{(t-dt)}}{G_t} \quad (7)$$

čia G – medienos masė, kg; $A_{(mediena, t)}$ – vidutinis radionuklido savitasis aktyvumas medienoje per laiką t , Bq/kg; $A_{(dirvo\z. sl.)}$ – organiniame ir neorganiniame dirvožemio sluoksnyje radionuklido paviršinio aktyvumo tankis, Bq/m²; PF – pernašos koeficientas, m²/kg; dt – prieaugio laikas, dažniausiai 1 metai; dG – medienos prieaugis per laiką dt , kg; $A_{(mediena, t-dt)}$ – radionuklido vidutinis savitasis aktyvumas medienoje per laiką $(t-dt)$, Bq/kg; $G_{(t-dt)}$ – medienos prieaugis per laiką $(t-dt)$, kg; G_t – medienos prieaugis per laiką t , kg.

Remiantis eksperimentiniais tyrimo duomenimis įvertinus ⁹⁰Sr pernašos iš dirvožemio į medieną koeficientą, šiame darbe pritaikytas *FORM* modelis ⁹⁰Sr pernašai iš dirvožemio į medieną įvertinti. Pernašos koeficientas nustatytas pagal (8) formulę (Pliopaitė Bataitienė ir Butkus 2006):

$$PF = \frac{C_{m.p.}}{C_{m.s.}} \quad (8)$$

čia PF – ⁹⁰Sr pernašos iš dirvožemio į augalą koeficientas, m²/kg; $C_{m.p.}$ – ⁹⁰Sr savitasis aktyvumas augale, Bq/kg; $C_{m.s.}$ – užterštumo ⁹⁰Sr paviršinis tankis dirvožemyje, Bq/m².

Pagrindinė formulė, naudojama ⁹⁰Sr savitajam aktyvumui medienoje įvertinti:

$$A_{(mediena, t)} = \frac{A_{(dirvo\z. sl.)} \cdot \frac{C_{m.p.}}{C_{m.s.}} \cdot dt \cdot dG + A_{(mediena, t-dt)} \cdot G_{(t-dt)}}{G_t} \quad (9)$$

Įvertinus ⁹⁰Sr savitąjį aktyvumą pušies medienoje (A) ir žinant medžio sukauptą masę (G), kuri gali būti įvertinta pagal (5), (6) formules, galima nustatyti bendrą augalo sukaupto radionuklido aktyvumą. ⁹⁰Sr savitojo aktyvumo kaita medienoje nustatoma, įvertinant ⁹⁰Sr radioaktyvųjų suskilimą. ⁹⁰Sr savitojo aktyvumo medienoje kaita suskirstoma į būdinguosius periodus. Būdingiesiems periodams sudaromi ⁹⁰Sr savitojo aktyvumo ir pušies biomasės prieaugio priklausomybės grafikai, pagal kuriuos nustatomos kaitos kreivės. Pagal nustatytas savitojo aktyvumo ir pušies biomasės prieaugio priklausomybės kreives integralų sumavimo metodu nustatomas

bendras sukauptas ⁹⁰Sr aktyvumas pušies medienoje pagal tokią matematinę išraišką:

$$A_{sum} = \int_{G_1}^{G_2} f_1(A) dG + \int_{G_2}^{G_3} f_2(A) dG + \dots + \int_{G_{n-1}}^{G_n} f_{n-1}(A) dG \quad (10)$$

čia A_{sum} – bendras sukaupto ⁹⁰Sr kiekio aktyvumas pušies kamieno medienoje, Bq; $f_n(A)$ – savitojo aktyvumo ir pušies biomasės prieaugio priklausomybės kreivės; G – medžio sukaupta medienos masė, kuri įvertinta pagal (5), (6) formules, kg.

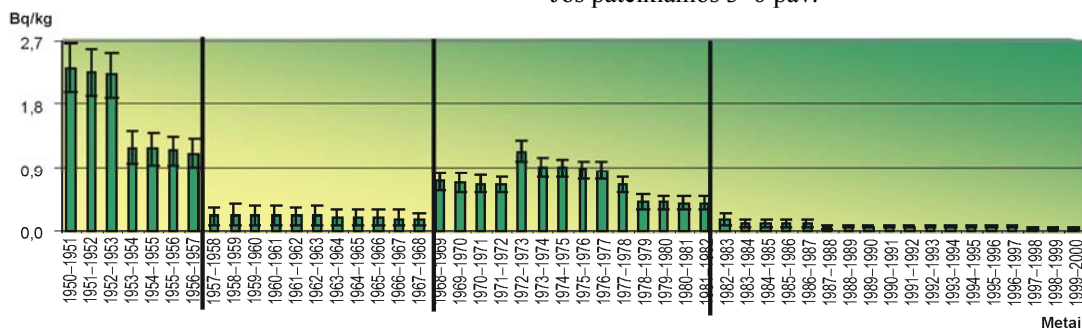
3. ⁹⁰Sr savitojo aktyvumo paprastosios pušies medienoje tyrimo rezultatai

2 pav. pateikiami ⁹⁰Sr savitojo aktyvumo kaitos rezultatai, nustatyti 2006 m., įvertinant radioaktyvųjų ⁹⁰Sr skilimą.

Per visą medžio augimo laiką (1950–2000 m.) ⁹⁰Sr savitasis aktyvumas kito nuo (0,03±0,01) Bq/kg iki (2,32±0,34) Bq/kg. 1950–1957 m. ⁹⁰Sr savitasis aktyvumas kito nuo (1,11±0,21) iki (2,32±0,34) Bq/kg. 1957–1968 m. ⁹⁰Sr savitasis aktyvumas nežymiai mažėjo nuo (0,15±0,09) Bq/kg iki (0,22±0,01) Bq/kg. 1968–1982 m. ⁹⁰Sr savitasis aktyvumas kito nuo (0,38±0,10) iki (1,13±0,16) Bq/kg. 1982–2000 m. ⁹⁰Sr savitasis aktyvumas mažėjo nuo (0,16±0,09) Bq/kg iki (0,03±0,01) Bq/kg.

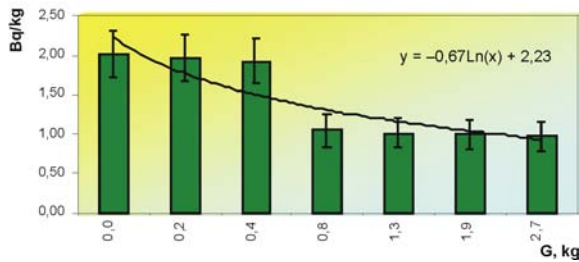
Pagal 2 pav. pateiktų duomenų kaitą galima išskirti periodus, kai ⁹⁰Sr savitasis aktyvumas medienoje, kuri buvo paimta 1 m nuo kelmo, yra padidėjęs (1950–1957 m., 1968–1982 m.) ir sumažėjęs (1957–1968 m., 1982–2000 m.). 1950–1957 m. padidėjęs ⁹⁰Sr savitasis aktyvumas medienoje galėjo būti vykdytų branduolinių sprogdinimų atmosferoje pasekmė. 1957–1968 m. ⁹⁰Sr savitojo aktyvumo medienoje sumažėjimą galėjo lemti tai, kad buvo draudžiami branduoliniai sprogdinimai atmosferoje, tačiau jie buvo vykdomi po žeme. Branduolinių sprogdinimų atmosferoje nulemtų radionuklidų migraciją į gilesnius dirvožemio sluoksnius galėjo atspindėti ⁹⁰Sr patekimas į medį per šaknų sistemą 1968–1982 m. 1982–2000 m. mažus ⁹⁰Sr kiekius medienoje lėmė vertikalioji radionuklido migracija dirvožemyje ir branduolinių sprogdinimų atmosferoje nebuvimas. ⁹⁰Sr savitojo aktyvumo kaitoje (2 pav.) išskirti būdingieji periodai pažymėti vertikaliomis ištisinėmis linijomis.

Išskirtiems būdingiesiems periodams sudaromos ⁹⁰Sr savitojo aktyvumo ir biomasės prieaugio kaitos kreivės. Jos pateikiamos 3–6 pav.



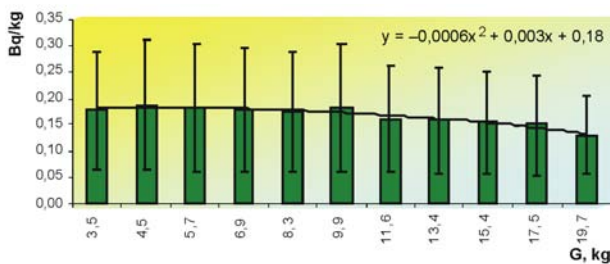
2 pav. ⁹⁰Sr savitojo aktyvumo kaita metinių rievų medienos mėginiuose, kurie buvo paimti 1 m nuo kamieno aukštyje, įvertinus radioaktyvųjų skilimą

Fig. 2. Variation of ⁹⁰Sr activity in tree ring wood at 1 m height from litter, considering radioactive decay



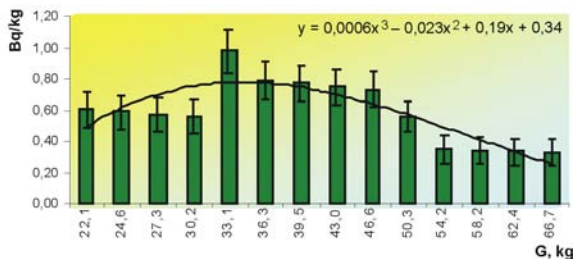
3 pav. ⁹⁰Sr savitojo aktyvumo ir biomasės priklausomybė 1950–1957 m.

Fig. 3. Relationship between ⁹⁰Sr activity and biomass in 1950–1957



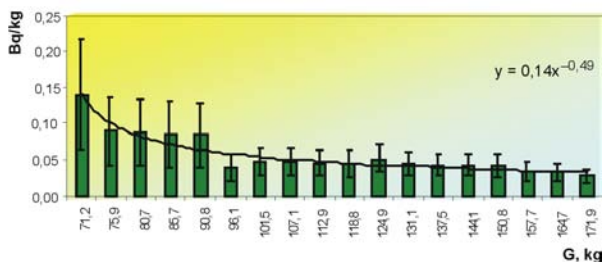
4 pav. ⁹⁰Sr savitojo aktyvumo ir biomasės priklausomybė 1957–1968 m.

Fig. 4. Relationship between ⁹⁰Sr activity and biomass in 1957–1968



5 pav. ⁹⁰Sr savitojo aktyvumo ir biomasės priklausomybė 1968–1982 m.

Fig. 5. Relationship between ⁹⁰Sr activity and biomass in 1968–1982



6 pav. ⁹⁰Sr savitojo aktyvumo ir biomasės priklausomybė 1982–2000 m.

Fig. 6. Relationship between ⁹⁰Sr activity and biomass in 1982–2000

⁹⁰Sr savitojo aktyvumo ir biomasės priklausomybės 1950–1957 m. laikotarpiu kreivė aprašoma tokia išraiška:

$$f_1 = -0,67 \cdot \ln(G) + 2,23. \quad (11)$$

⁹⁰Sr savitojo aktyvumo ir biomasės priklausomybė 1957–1968 m. laikotarpiu kreivė nustatoma taip:

$$f_2 = -0,0006 \cdot G^2 + 0,003 \cdot G + 0,18. \quad (12)$$

⁹⁰Sr savitojo aktyvumo ir biomasės priklausomybės 1968–1982 m. laikotarpiu skaičiuojama pagal formulę:

$$f_3 = 0,0006 \cdot G^3 - 0,0023 \cdot G^2 + 0,19 \cdot G + 0,34. \quad (13)$$

⁹⁰Sr savitojo aktyvumo ir biomasės priklausomybės 1982–2000 m. laikotarpiu kreivė nustatoma pagal išraišką:

$$f_4 = 0,14 \cdot G^{-0,49}. \quad (14)$$

(11)–(14) formules įrašius į (10) lygybę, gaunama ⁹⁰Sr savitojo aktyvumo ir biomasės priklausomybės bendroji išraiška, pagal kurią įvertinamas sukauptas ⁹⁰Sr aktyvumas paprastosios pušies medienoje 2000-aisiais metais. Norint nustatyti susikaupusio ⁹⁰Sr aktyvumą medienoje įvairiais laikotarpiais, tikslinga įvertinti ne tik radionuklidą patekimą į medieną, bet ir radioaktyvųjį skilimą per tiriamąjį periodą. Tuomet gaunamos tokios skirtingų tiriamųjų laikotarpių empirinės priklausomybės:

$$A_{50-57} = \int_{G_1}^{G_2} f_1(A) dG \cdot e^{-\lambda \cdot \frac{t_1}{2}},$$

$$A_{50-68} = \left(\int_{G_1}^{G_2} f_1(A) dG \cdot e^{-\lambda \cdot \frac{t_1}{2}} \right) \cdot e^{-\lambda \cdot t_2} + \int_{G_2}^{G_3} f_2(A) dG \cdot e^{-\lambda \cdot \frac{t_2}{2}},$$

$$A_{50-82} = \left(\left(\int_{G_1}^{G_2} f_1(A) dG \cdot e^{-\lambda \cdot \frac{t_1}{2}} \right) \cdot e^{-\lambda \cdot t_2} \right) \cdot e^{-\lambda \cdot t_3} +$$

$$\left(\int_{G_2}^{G_3} f_2(A) dG \cdot e^{-\lambda \cdot \frac{t_2}{2}} \right) e^{-\lambda \cdot t_3} +$$

$$\left(\int_{G_3}^{G_4} f_3(A) dG \cdot e^{-\lambda \cdot \frac{t_3}{2}} \right),$$

$$A_{50-00} = \left(\left(\int_{G_1}^{G_2} f_1(A) dG \cdot e^{-\lambda \cdot \frac{t_1}{2}} \right) \cdot e^{-\lambda \cdot t_2} \right) \cdot e^{-\lambda \cdot t_3} \cdot e^{-\lambda \cdot t_4} +$$

$$\left(\int_{G_2}^{G_3} f_2(A) dG \cdot e^{-\lambda \cdot \frac{t_2}{2}} \right) e^{-\lambda \cdot t_3} \cdot e^{-\lambda \cdot t_4} +$$

$$\left(\int_{G_3}^{G_4} f_3(A) dG \cdot e^{-\lambda \cdot \frac{t_3}{2}} \right) \cdot e^{-\lambda \cdot t_4} +$$

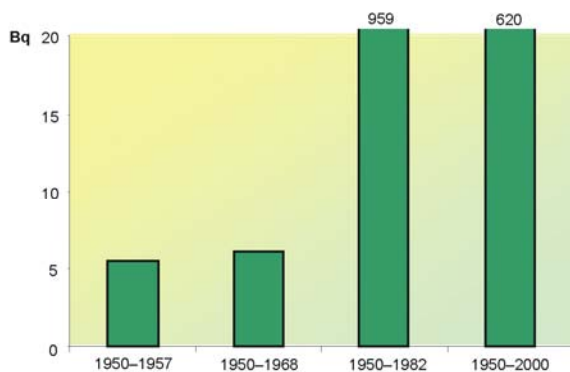
$$\left(\int_{G_4}^{G_5} f_4(A) dG \cdot e^{-\lambda \cdot \frac{t_4}{2}} \right),$$

(15)

čia f_n – savitojo aktyvumo ir pušies biomasės prieario priklausomybės kreivės; A_{sum} – bendras sukaupto ⁹⁰Sr kiekio aktyvumas pušies kamieno medienoje, Bq; G – medžio sukaupta medienos masė, įvertinta pagal (5), (6) formules, kg; A_{50-57} – bendras sukaupto ⁹⁰Sr kiekio aktyvumas pušies kamieno medienoje 1950–1957 m., Bq; A_{50-68} – bendras sukaupto ⁹⁰Sr kiekio aktyvumas pušies kamieno medienoje 1950–1968 m., Bq; A_{50-82} – ben-

dras sukaupto ^{90}Sr kiekio aktyvumas pušies kamieno medienoje 1950–1982 m., Bq; A_{50-00} – bendras sukaupto ^{90}Sr kiekio aktyvumas pušies kamieno medienoje 1950–2000 m., Bq; t_1, t_2, t_3, t_4 – laikotarpis nuo tiriamojo periodo pradžios iki pabaigos, m.

Pagal (15) formules gauta ^{90}Sr aktyvumo kaita paprastosios pušies (*Pinus sylvestris* L.) medienoje. Ši kaita pateikta 7 pav.



7 pav. ^{90}Sr aktyvumo dinamika pušies medienoje
Fig. 7. Dynamics of ^{90}Sr activity in pinewood

Remiantis 7 pav. duomenimis, matyti, kad didžiausią ^{90}Sr kiekį pušis sukauptė 1950–1982 m. laikotarpiu – 959 Bq.

Pagal 2 skyriuje aprašytą ^{90}Sr migracijos iš dirvožemio į medieną *FORM* modelį naudojant formules (5)–(9) gauti rezultatai pateikiami 8 pav.

Vizualiai vertinant 8 pav. pateiktus duomenis galima pastebėti, kad *FORM* modelio rezultatai ir eksperimentinių tyrimų rezultatai yra artimi. Atlikus *FORM* modelio rekomenduojamus skaičiavimus ir, papildžius juos pernašos iš dirvožemio į pušies medieną įvertinimu, gauta, kad santykinė paklaida $\left(\frac{\max - \min}{\max} \cdot 100\%\right)$ tarp tyrimo ir mode-

lio rezultatų kinta nuo 11 % iki 15,3 %, o vidutinė paklaida yra lygi 13,2 %. Remiantis įvertintomis santykinėmis paklaidomis tarp tyrimo ir modelio rezultatų, galima daryti išvadą, kad *FORM* modelis tinka ^{90}Sr modeliuoti sistemoje dirvožemis–medis, jeigu jis yra papildomas ^{90}Sr pernašos iš dirvožemio į medieną koeficientais.

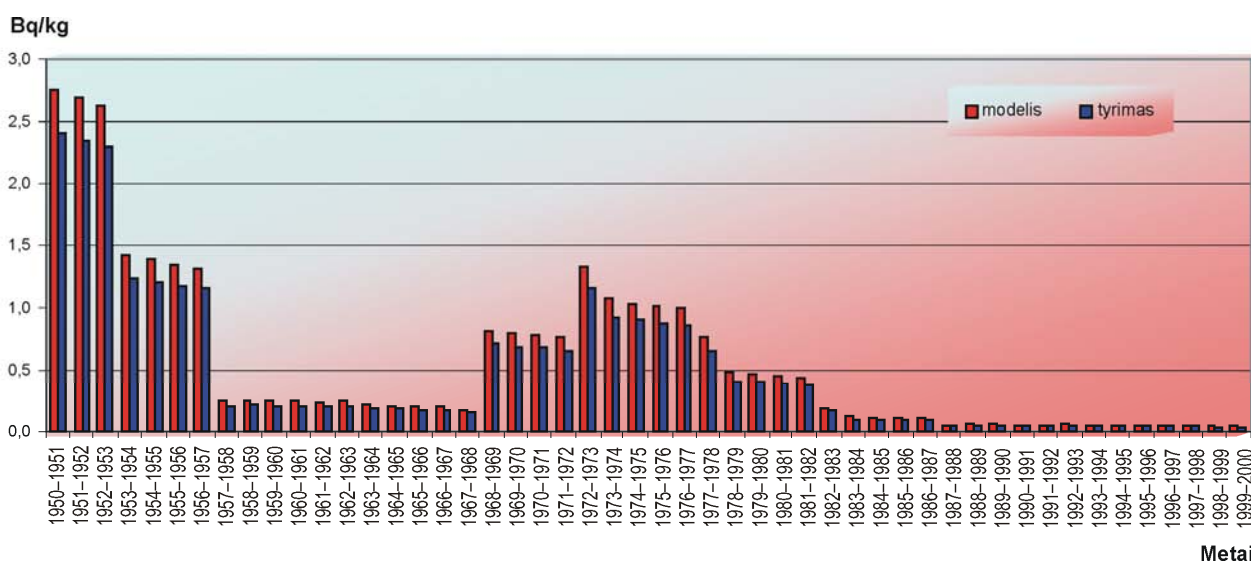
4. Išvados

1. Nustatyta, kad 1950–2000 m. ^{90}Sr savitasis aktyvumas kito nuo $(0,03 \pm 0,01)$ Bq/kg iki $(2,32 \pm 0,34)$ Bq/kg: 1950–1957 m. ^{90}Sr savitasis aktyvumas mažėjo nuo $(1,11 \pm 0,21)$ iki $(2,32 \pm 0,34)$ Bq/kg; 1957–1968 m. ^{90}Sr savitasis aktyvumas nežymiai mažėjo nuo $(0,15 \pm 0,09)$ Bq/kg iki $(0,22 \pm 0,01)$ Bq/kg; 1968–1982 m. ^{90}Sr savitasis aktyvumas didėjo nuo $(1,13 \pm 0,16)$ Bq/kg iki $(0,38 \pm 0,10)$ Bq/kg, o vėliau mažėjo nuo $(0,16 \pm 0,09)$ Bq/kg iki $(0,03 \pm 0,01)$ Bq/kg.

2. ^{90}Sr kaupimąsi paprastosios pušies medienoje lėmė jo pernaša iš dirvožemio. Pernašos koeficientas priklausomai nuo išorinės medžio taršos ir patekimo per jo šaknų sistemą intensyvumo tam tikrais laikotarpiais kito – daug didesnės už vidutinę vertę buvo 1950–1957 m. ir 1968–1982 m., mažesnis – 1957–1968 m. bei 1983–2000 m.

3. Pagal straipsnyje pasiūlytą sukaupto ^{90}Sr kiekio aktyvumo įvertinimo modelį apskaičiuota, kad didžiausias ^{90}Sr aktyvumas paprastosios pušies medienoje per pušies augimo laikotarpį (1950–2000 m.) buvo 32-aisiais augimo metais (1982 m.) ir sudarė 959 Bq, o 50-aisiais augimo metais (2000 m.) siekė 620 Bq.

4. Nustatyta, kad naudojant *FORM* modelį gauti rezultatai eksperimentinių duomenų rezultatus viršija vidutiniškai 13 %.



8 pav. ^{90}Sr savitojo aktyvumo pušies medienoje modeliavimo rezultatai
Fig. 8. Results of modeling ^{90}Sr activity in pinewood

Literatūra

- Bataitis, T.; Butkus, D. 2006. ⁹⁰Sr savitojo aktyvumo pušies (*Pinus sylvestris* L.) medienoje nustatymo metodika, iš 9-osios Lietuvos jaunujų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusios Vilniuje 2006 m. kovo 30 d., pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 543–549.
- Botezatu, E.; Iacob, O. 1999. Contribution of the Chernobyl accident to human incorporation of strontium – 90, *Radiation Medicine* 2(2): 71–74.
- Butkus, D.; Beinaravičius R. 2002. Medžio įtaka ¹³⁷Cs pasiskirstymui dirvožemyje, *Sveikatos mokslai* 2(18): 56–58.
- Buzinny, M.; Los⁺, I.; Shepelevich, K. 2000. The Distribution of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the biomass of pine trees planted in 1997–1998 in the near zone of the Chernobyl nuclear power plant, *Applied Radiation and Isotopes* 52: 905–910.
- Chigira, M.; Saito, Y.; Kimura, K. 1988. Distribution of ⁹⁰Sr in annual tree rings of Japanese cedar, *Cryptomeria japonica* D. Don, *Journal of Radiation Research* 29(2): 152–160.
- Yvanov, Y. A. et al. 1997. Migration of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr from Chernobyl fallout in Ukrainian, Belarussian and Russian Soils, *Journal of Environmental Radioactivity* 35(1): 1–21.
- Kagawa, A.; Aoki, T.; Okada, N.; Katayama, Y. 2002. Tree – Ring Strontium – 90 and Cesium – 137 as Potential Indicators of Radioactive Pollution, *Journal of Environmental Quality* 31: 2002–2007.
- Kanapickas, A.; Raupelienė, V. 2004. Kritinis α ir β spindulių aktyvumas aplinkoje, *Sveikatos mokslai* 3: 79 – 83.
- LAND 64-2005. Radioaktyvaus stroncio-90 nustatymas aplinkos elementų mėginiuose. Radiocheminis metodas. 8 p.
- Laurinavičius, A.; Čygas, D.; Čiuprinskas, K.; Juknevičiūtė, L. 2007. Data Analysis and Evaluation of Road Weather Information System Integrated in Lithuania, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 2(1): 5–11.
- Lietuvos metaloekologų draugija, Lietuvos dirvožemių užterštumo radionuklidais įvertinimas. Vilnius, 1997–1998. 116 p.
- Malek, M. A.; Hinton, T. G.; Webb, S. B. 2000. A comparison of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs uptake in plants via three pathways at two Chernobyl – contaminated site, *Journal of Environmental Radioactivity* 58: 129–141.
- Marčiulionienė, D.; Kiponas, D.; Hansen, D. 2001. Technogeninių radionuklidų akumuliacija Ignalinos AE aplinkoje, *Ekologija* 1: 52–59.
- Marčiulionienė, E. D.; Kiponas, D. 1999. Peculiarities of ¹³⁷Cs accumulation in plants from atmosphere and soil, in *The 4th Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic*, 253–255.
- Modeling the migration and accumulation of radionuclides in forest ecosystems IAEA, VIENNA [Radionuklidų migracijos ir kaupimosi miško ekosistemose modeliavimas IAEA, VIENNA]. 2002. 136 p. ISBN 92–0–114902–6.
- Nedveckaitė, T. 2004. *Radiacinė sauga Lietuvoje*. Vilnius: Kriventa. 239 p.
- Pliopaitė Bataitienė, I.; Butkus, D. 2006. Radionuklidų pernašos iš dirvožemio į pušį (*Pinus sylvestris* L.) koeficientų tyrimas, iš 9-osios Lietuvos jaunujų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, įvykusios Vilniuje 2006 m. kovo 30 d., pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 155–161.
- Strontium – 90 *Environmental health programs*. 2002. 3 p. Prieiga per internetą: <www.washingtonstatedepartmentofhealth.com/2002>.
- Strontium – 90. 2006 [žiūrėta 2006 10]. Prieiga per internetą: <http://en.wikipedia.org/wiki/Strontium-90>.
- Батурич, В. А. 1997. Вертикальная миграция радионуклидов в почве Восточно-Уральского следа и ее влияние на интенсивность исходящего излучения, *Атомная энергия* 82: 44–48.
- Василенко, И. Я.; Василенко, О. И. 2002. Радиоактивный стронций, *Энергия: экономика, техника, экология* 4: 26–32.
- Радиоактивное загрязнение, ⁹⁰Sr*. 2004. 3 p. [žiūrėta 2004 01 17]. Prieiga per internetą: <www.booksite.ru/fu//text/1/001/008/094/876.html/ 2004>.

INVESTIGATION OF ⁹⁰Sr ACUMULATION IN PINWOOD (*PINUS SYLVESTRIS* L.)

D. Butkus, I. Pliopaitė Bataitienė, T. Bataitis

Abstract

The paper presents changes of ⁹⁰Sr activity in pinewood (*Pinus sylvestris* L.), which in studied conditions varies from (0,03±0,01) Bq/kg to (2,32±0,34) Bq/kg. Activity was defined experimentally and by modelling, using the model FORM. The measured results and those established by the model differ averagly by 13%. For definition of the accumulated ⁹⁰Sr activity in wood of a simple pine, the method of summarization of activity integrals was used after establishment of function of dependence between ⁹⁰Sr activities and pine biomass augment. By this method it was estimated that in the wood of 50-year pines in 2006 ⁹⁰Sr activity was 620 Bq. ⁹⁰Sr transfer coefficient from ground to pinewood was studied in the work. During the pine growth this coefficient varied from (2,0 ± 1,0) · 10⁻⁴ m²/kg to (9,7 ± 1,0) · 10⁻⁴ m²/kg.

Keywords: ⁹⁰Sr, radionuclide transfer, system “soil – wood”, *Pinus sylvestris* L., radionuclide activity.

НАКОПЛЕНИЕ ^{90}Sr В ДРЕВЕСИНЕ ПРОСТОЙ СОСНЫ (*PINUS SYLVESTRIS* L.)**Д. Буткус, И. Плэпайте Батайтене, Т. Батайтис****Резюме**

Приводятся данные об изменении концентрации активности ^{90}Sr в древесине простой сосны (*Pinus sylvestris* L.), в изучаемых условиях меняющейся от $(0,03 \pm 0,01)$ Бк/кг до $(2,32 \pm 0,34)$ Бк/кг. Концентрация активности определялась как экспериментально, так и с использованием модели FORM. Различия между измеренными результатами и установленными при помощи модели в среднем составляют 13%. Для определения общей активности ^{90}Sr в древесине простой сосны в работе предложен метод суммирования интегралов активности после установления функции зависимости концентрации активности от годового прироста массы древесины. Этим методом установлено, что активность ^{90}Sr в древесине 50-летней сосны в 2006 г. составляла 620 Бк. Изучен коэффициент переноса ^{90}Sr из почвы в древесину простой сосны. Во время роста сосны он менялся от $(2,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-4}$ м²/кг до $(9,7 \pm 1,0) \cdot 10^{-4}$ м²/кг.

Ключевые слова: ^{137}Cs , ^{90}Sr , миграция радионуклидов, система почва–дерево, *Pinus sylvestris* L., удельная активность.

Donatas BUTKUS. Dr Habil, Prof, Dept of Environmental Protection, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU). Doctor Habil. of Science (environmental engineering), VGTU, 1999. Membership: a member of International Academy of Ecological and Life Protection Sciences. Publications: author of more than 200 research papers, co-author of monograph *Geophysical problems of atmospheric krypton-85* (in Russian and English). Research interests: accumulation of radioactive noble gases, their interaction with environmental bodies, self-cleaning of atmosphere, influence of ionizing radiation of radioactive noble gases on geophysical processes; consequences of Chernobyl accident in Lithuania. Investigation of environment physical pollution (ionic and non ionic radiation, noise, vibration).

Ingrida PLIOPAITĖ BATAITIENĖ. Master, doctoral student, Dept of Environmental Protection, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU). Doctoral student, VGTU, 2006. Master of Science (environmental engineering), VGTU, 2006. Bachelor of Science (environmental engineering), VGTU, 2004. Research interests: environmental radioactivity.

Tautvydas BATAITIS. Master student, Dept of Environmental Protection, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU). Master student, VGTU, 2007. Bachelor of Science (environmental engineering), VGTU, 2004. Research interests: environmental radioactivity.