

OPTIMALIOS INTERPOLIACIJOS METODO TAIKYMAS LYGIAVERTĖS DOZĖS GALIOS LAUKO STRUKTŪRAI NUSTATYTI BALTIJOS JŪROS PRIEKRANTĖJE

Dmitrijus Styra¹, Linas Jonas Gustas², Mindaugas Lemežis³

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹styra@fm.vgtu.lt; ²linasg@dtiltas.lt; ³lemezis.m@gmail.com

Anotacija. Baltijos jūros priekrantėje, prie Juodkrantės, atlikti lygiavertės dozės galios (LDG) matavimai prie žemės paviršiaus ir 1 m aukštyje nuo žemės paviršiaus. Matavimai atlikti 2008 m. liepos 2 ir 10 d. 63 taškuose 2,0×0,2 km teritorijoje esant šiaurės ir pietų vėjo kryptims. Vidutinių dydžių ekstremalios reikšmės buvo 51 nSv/h ir 90 nSv/h. Tai parodo, kad LDG laukų struktūra yra nehomogeninė. LDG laukų struktūrai nustatyti ir įvertinti buvo taikytas optimalios interpoliacijos metodas trims atvejams – kai tyrimų teritorijoje atlikta 63, 33 ir 18 matavimų. Gautas identiškios LDG laukų struktūros. Rasta, kad naudojant tik 18 matavimo rezultatų modelyje gaunamas patenkinamas eksperimentinių ir teorinių rezultatų sutapimas, t. y. jų skirtumas neviršija 15 % iš 80 % duomenų palyginimo.

Reikšminiai žodžiai: Kuršių nerija, radionuklidai, lygiavertės dozės galia, optimalios interpoliacijos metodas.

Įvadas

Natūralios kilmės radionuklidai patenka į aplinką iš dirvožemio, taip pat susidaro sąveikaujant kosminiams spinduliams su oro molekulių branduoliais. Iš dirvožemio išsiskiria radonas ir jo skilimo produktai, kurie formuoja pagrindinę atmosferos pažemio radioaktyviųjų medžiagų dalį. Hidrosferoje dažniausia pasitaikantis natūralios kilmės radionuklidas yra kalis-40 (Стыро 1968; Lebedytė, Butkus 2001; Lebedytė *et al.* 2003). Iki šiol egzistuoja dirbtinės kilmės globalios iškritos, kurios papildo bendrąją aplinkos radioaktyvųjų foną (Стыро 1989).

Tačiau galimas neprognozuojamas radioaktyvusis poveikis, kuris gali labai pakeisti esamą radioaktyviąją pusiausvyrą. Dėl šios priežasties būtina aplinkos radioaktyvumo kontrolė. Tokia kontrolė turėtų būti vykdoma didelėse teritorijose, pavyzdžiui, Baltijos, Šiaurės jūrose, virš kontinentų regionų, atsižvelgiant į jų reljefą bei dirvožemio struktūras ir t. t. Tam tikslui reikia daug eksperimentinės informacijos apie esamą situaciją aplinkoje, apie jos pokyčius erdvėje ir laike bei jos prognozę.

Eksperimentinės informacijos rinkimas didelėse teritorijose yra ilgalaikis ir brangus procesas. Todėl tai pačiai informacijai gauti, esant mažesniai matavimų skaičiui, taikomas teorinis modelis – optimalioji interpoliacija. Šis modelis leidžia nustatyti lygiavertės dozės galią tose vietose, kuriose nebuvo atlikta matavimų, taip pat skaičiavimo rezultatų paklaidą (Стыро 1989).

Šiame darbe imituojama radiacinė situacija, kuri galima didelėse teritorijose, bet keliomis eilėmis sumažinta ir taikoma mažiems plotams.

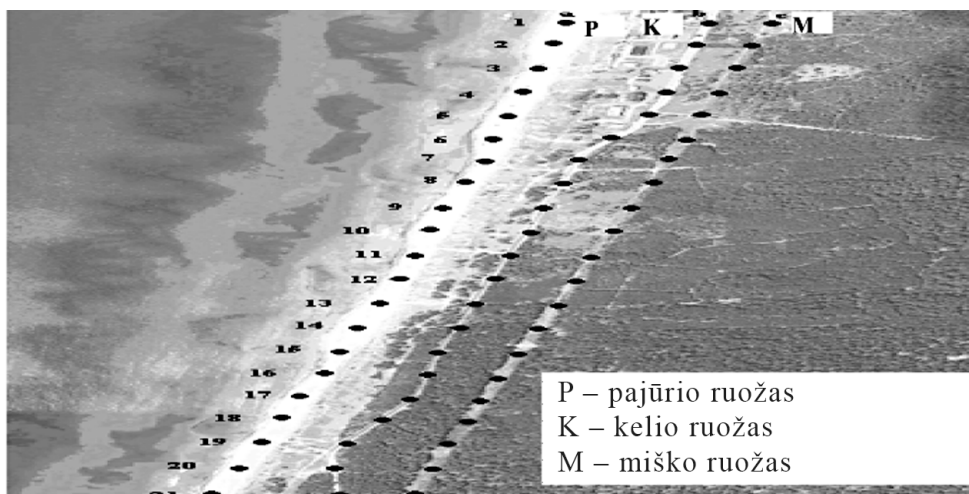
LDG matavimams buvo parinkta 0,4 km² teritorija Baltijos jūros priekrantėje prie Juodkrantės (1 pav.).

Darbo tikslas – optimalios interpoliacijos metodo patikra ir LDG lauko realios struktūros atstatymo galimybė nedidelėse teritorijose, esant minimaliam matavimų skaičiui.

Lygiavertės dozės galios matavimų medžiaga ir metodika

Lygiavertės dozės galia (LDG) atmosferos pažemio sluoksnyje buvo nustatyta scintiliaciniu radiometru SRP-88N. Prietaisas pritaikytas dirbti lauko sąlygomis, nešiojamas, maitinamas elektros baterijomis. Pagrindiniai jo parametrai: energinis registracinis slenkstis – 30 keV, santykinė matavimų paklaida – 10 %, vieno matavimo laikas – 10 s, jutiklio kristalo NaI (TI) matmenys – 25×40 mm.

Lygiavertės dozės galia buvo matuojama virš natūralių ir dirbtinių šaltinių tam, kad surinkti duomenys turėtų nehomogeninių laukų struktūrą. Atlikti matavimai trijuose keliuose: išilgai jūros kranto (drėgnas smėlis), virš asfalto tako ir išilgai miško (sausas smėlis). Eksperimentiniai rezultatai gauti 63 taškuose, t. y. reguliaraus tinklo mazguose, tarp kurių atstumas – 100 m. Matavimai buvo atlikti 2008-07-02 esant šiaurės krypties ir 6 m/s vidutiniam vėjo greičiui bei 2008-07-10 esant pietų kryp-



1 pav. Lygiavertės dozės galios matavimo vieta (Tyrimų vietos žemėlapis, 2008)

Fig. 1. The place of equivalent dose rate measurement

ties ir 3 m/s vidutiniam vėjo greičiui. Gautų rezultatų įvairūs variantai buvo naudoti teoriniame modelyje.

Lygiavertės dozės galios lauko struktūrai atkurti pritaikytas optimalios interpoliacijos metodas. Jį sudaro šie etapai:

1) tiriamo elemento optimali interpoliacija į tas vietas, kuriose nebuvo matavimų, arba į reguliaraus tinklo mazgus;

2) suderinamas procesas, numatantis ryšius tarp vieno ir to paties elemento lauko skirtingais laiko momentais;

3) klaidingų duomenų išaiškinimas ir pašalinimas arba jų ištaisymas.

Skaičiuojant lygiavertės dozės galios lauką, buvo priimta keletas prielaidų.

Tegul C_i – lygiavertės dozės galia taškuose ir $\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$ – vidutinė lygiavertės dozės galios vertė, o C'_i – nuokrypa nuo vidurkio:

$$C'_i = C_i - \bar{C}. \quad (1)$$

Pagrindinė taikomo optimaliosios interpoliacijos metodo charakteristika yra normuotoji autokoreliacinė funkcija $\mu_k = \mu_k(\rho_k; \rho_{k+1})$, priklausanti nuo lygiavertės dozės galios taškuose, atstumas tarp kurių $\rho_k < \rho \leq \rho_{k+1}$. Taip pat ši funkcija priklauso nuo tų taškų koordinatų. Tada, prieš skaičiuojant autokoreliacinę funkciją $\mu(\rho_k)$, matavimo taškai padalijami į grupes, priklausomai nuo atstumo tarp jų. Siekiant automatizuoti skaičiavimo procesą, atstumas tarp i ir j taškų apskaičiuotas pagal formulę:

$$\rho_{ij} = 6377 \arccos \left(\frac{\cos \alpha_i \cos \alpha_j \cos(\beta_i - \beta_j) + \sin \alpha_i \sin \alpha_j}{1} \right), \quad (2)$$

čia: α_i – i -tojo taško geografinė platumą; β_i – i -tojo taško geografinė ilguma;

$\arccos(\cos \alpha_i \cos \alpha_j \cos(\beta_i - \beta_j) + \sin \alpha_i \sin \alpha_j)$ reikšmė duota radianais; $\rho_{i,j}$ – atstumas tarp i ir j taškų, km.

Tada kiekvienai taškų grupei apskaičiuojama normuotoji autokoreliacinė funkcija taškuose:

$$\mu(\rho_k) = \frac{1}{\mu_0 N_k} \sum_{i,j=1}^{N_k} C'_i C'_j, \quad (3)$$

čia: $C'_i = C_i - \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N C_j$; $\mu_0 = \frac{1}{m_k} \sum_{i=0}^{m_k} (C'_i)^2$; N – taškų,

kuriuose atlikti matavimai, skaičius; C_i – lygiavertės dozės galia i -tajame taške; m_k – taškų porų, tarp kurių atstumas priklauso intervalui $[(k-1)\Delta\rho; k\rho)$, skaičius;

$\rho_k = (k-0,5)\rho$; $k = 1, 2, 3, \dots$ – grupių skaičius; N_k – visų įmanomų sandaugų $C'_i C'_j$ skaičius.

Apskaičiavus $\mu(\rho_k)$ reikšmes taškuose ρ_k , gautos diskretinės autokoreliacinės funkcijos vertės aproksimuotos pagal mažiausiųjų kvadratų metodą, nes pagrindinę dalį sudaro autokoreliacinė funkcija (Стыро 1989).

Autokoreliacinės funkcijos sudarytos pagal formulę $\mu(\rho) = e^{-\alpha\rho}$,

čia: ρ – atstumas tarp lygiavertės dozės galios matavimo vietų, km, $\rho = 0,275$ km; α – aproksimavimo parametras.

Nustatyta, kad lygiavertės dozės galios autokoreliacinė funkcija aprašoma formule $\mu(\rho) = e^{-0,2\rho}$.

Kita sprendžiamo uždavinio dalis – tiesinių lygčių sistema, kurią išsprendus gaunami nežinomi svoriai:

$$\sum_{j=1}^n \mu_{i,j} P_j^{(0)} = \mu_{j,0}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (4)$$

čia: $\mu_{i,j} = \mu(\rho_{i,j})$; $P_j^{(0)}$ – nežinomi svoriai; $\rho_{i,0}$ – atstumas tarp i -tojo taško ir taško, kuriame atstatoma lygiavertės dozės galios vertė.

Išsprendus lygčių sistemą, gaunamos reikšmės P_1, P_2, \dots, P_n ir apskaičiuojama ieškoma reikšmė $C_{i,0}$:

$$C_{i,0} = C'_{i,0} + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N C_j = \sum_{j=1}^N P_j^{(0)} C'_j + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N C_j. \quad (5)$$

Autokoreliacinės funkcijos parinkimo tikslumas, atkuriant LDG lauko struktūrą, apibrėžia pagrindinę lygiavertės dozės galios paklaidą duotame lauko taške. Vidutinė kvadratinė E lauko elementų skaičiavimo paklaida nustatoma optimaliai parenkant svorius P_i :

$$E = \left(C'_0 - \sum_{i=1}^n P_i C'_i \right)^2 = \min. \quad (6)$$

Tada svoriai P_i randami iš n lygčių sistemos

$$\sum_{i=1}^n \mu_{i,j} P_j = \mu_{0,i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (7)$$

Iš čia optimalios interpoliacijos metodo paklaida:

$$\varepsilon = 1 - \sum_{i=1}^n \mu_{0,i} P_i. \quad (8)$$

Optimalios interpoliacijos metodu gautos lygiavertės dozės galios lauko elementų vertės išrenkamos tos, kurių apskaičiuotų lygiavertės dozės verčių dispersija mažesnė ar lygi eksperimentiniu būdu gautų rezultatų dispersijai.

Aprašytame metode teigiama, kad atkuriamas lygiavertės dozės galios laukas turi būti stacionarus ir izotropiškas, todėl metodo efektyvumas priklauso nuo šių sąlygų išpildymo (Стыро 1989).

Rezultatai

LDG matavimai buvo atlikti Baltijos jūros priekrantėje (1 pav.), esant įvairiems vėjo greičiams ir kryptims.

Radono ir jo skilimo produktų ekshalicija iš dirvožemio priklauso nuo žemės paviršiaus struktūros, o jo struktūra skirtinga – drėgnas smėlis, asfaltas, sausas smėlis. Todėl radono ir jo skilimo produktų patekimas į atmosferą buvo skirtingas. Nevienalytis žemės paviršius sudarė sąlygas susiformuoti skirtingoms LDG laukų struktūroms pažemio oro sluoksnyje. Matavimo rezultatai pateikti 1 lentelėje.

Optimalios interpoliacijos metodas, esant stacionarumo sąlygai, buvo pritaikytas LDG laukų struktūrų ir jų pokyčių analizei.

Šis metodas buvo taikomas naudojant visą eksperimentinę informaciją (63 matavimo taškai), taip pat tam tikrą jos rezultatų dalį.

1 lentelė. LDG matavimo rezultatai (nSv/h) Baltijos jūros priekrantėje prie Juodkrantės 2008 m. liepos 2 ir 10 d.

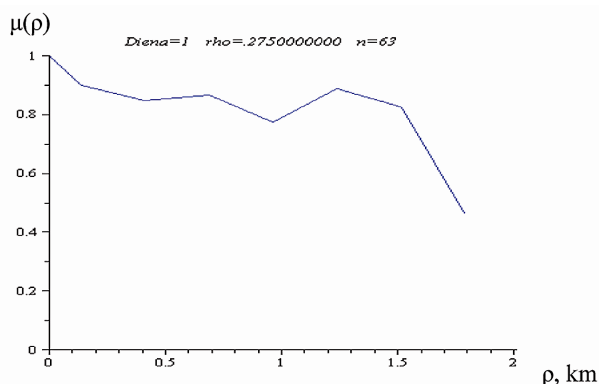
Table 1. Equivalent dose rate measurement results (nSv/h) in the Baltic sea coast near Juodkrantė in July 2 and 10 of 2008

Data	2008-07-02						2008-07-10					
	LDG pajūryje, nSv/h		LDG take, nSv/h		LDG miške, nSv/h		LDG pajūryje, nSv/h		LDG take, nSv/h		LDG miške, nSv/h	
	atstumas nuo žemės paviršiaus, m		atstumas nuo žemės paviršiaus, m		atstumas nuo žemės paviršiaus, m		atstumas nuo žemės paviršiaus, m		atstumas nuo žemės paviršiaus, m		atstumas nuo žemės paviršiaus, m	
	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	70	70	130	100	70	70	80	70	120	110	70	60
2	60	60	120	100	70	70	60	50	100	90	70	70
3	60	60	80	70	70	60	60	50	80	80	70	60
4	60	60	80	80	70	60	50	50	80	70	60	70
5	50	50	70	60	70	60	50	60	80	80	70	60
6	50	50	80	70	70	70	60	40	90	70	80	70
7	50	50	90	70	70	60	60	40	80	70	60	70
8	50	50	70	60	70	60	40	50	90	70	60	60
9	50	50	80	90	70	60	50	50	80	80	70	70
10	50	50	90	80	70	60	60	60	90	80	80	70

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
11	60	60	90	80	60	60	50	60	80	70	70	70
12	50	50	80	70	70	70	50	50	100	90	70	70
13	50	50	90	90	70	60	60	50	90	80	70	60
14	50	50	80	70	70	60	50	50	80	80	80	70
15	50	50	80	80	60	60	50	50	90	70	60	60
16	50	50	80	80	60	60	50	50	90	80	70	60
17	60	60	90	80	70	60	60	50	90	80	70	60
18	60	50	100	90	70	60	50	50	90	90	70	60
19	50	50	90	80	70	60	50	50	90	80	70	60
20	50	50	110	90	70	60	50	50	100	80	60	60
21	50	50	130	100	70	60	50	50	110	90	70	60
Vidutinė vertė	54	53	84	80	69	62	54	51	90	80	69	64

LDG laukų struktūros ryšio kokybę nustato autokoreliacinės funkcijos. Jų konkretūs pavyzdžiai iliustruojami 2 ir 3 pav.

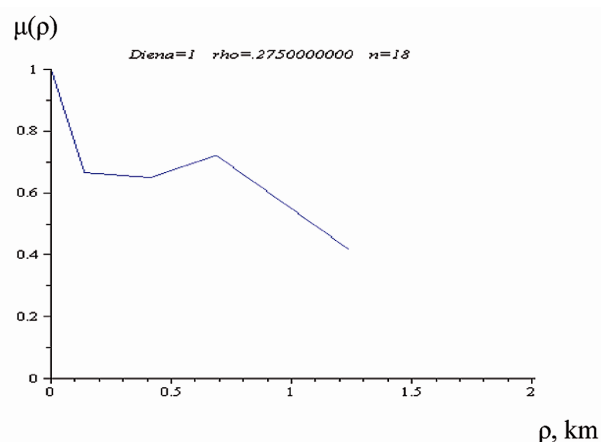
2 ir 3 pav. pavaizduotas stiprus koreliacinis ryšys tarp LDG lauko elementų. Natūralu, kad toje pačioje teritorijoje koreliacinis ryšys yra stipresnis tuo atveju, kai daugiau eksperimentinių duomenų.



2 pav. Autokoreliacinė funkcija 2008-07-02 situacijoje, esant LDG laukui 1 m aukštyje nuo žemės paviršiaus, kai teoriniame modelyje panaudoti 63 eksperimentiniai rezultatai

Fig. 2. Autocorrelation function in July 2 of 2008, when equivalent dose rate was measured 1 meter above ground surface, and 63 measurement results were used

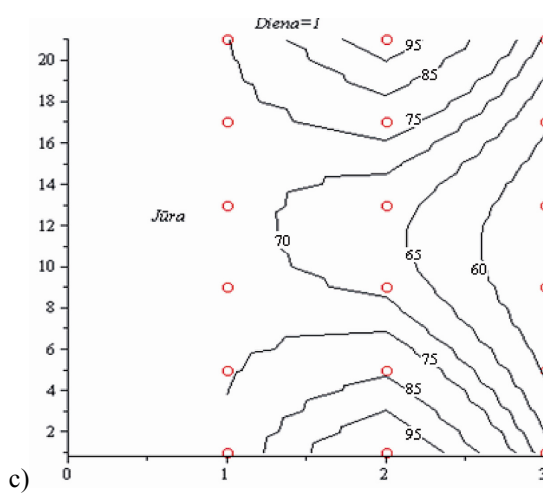
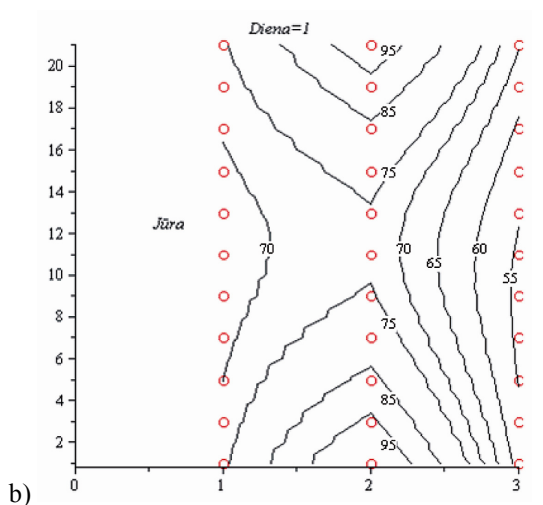
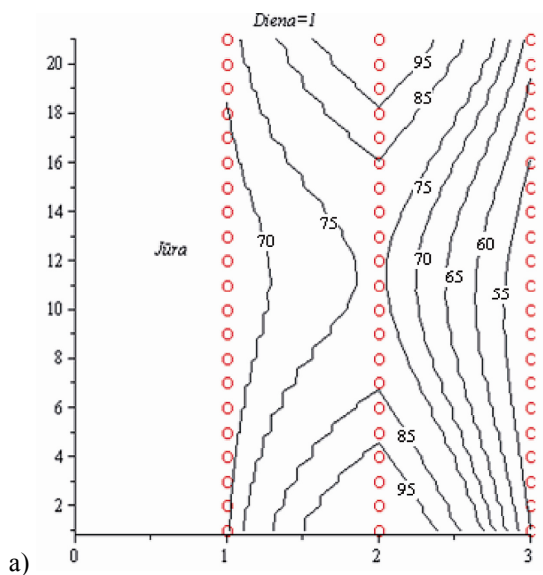
4 pav. pateiktos lygiavertės dozės galios laukų struktūros prie žemės paviršiaus 2008 m. liepos 2 d., gautos optimalios interpoliacijos metodu, naudojant visą eksperimentinę informaciją (63 matavimo taškus), 33 ir 18 matavimo taškų.



3 pav. Autokoreliacinė funkcija 2008-07-02 situacijoje, esant LDG laukui 1 m aukštyje nuo žemės paviršiaus, kai teoriniame modelyje panaudota 18 eksperimentinių rezultatų

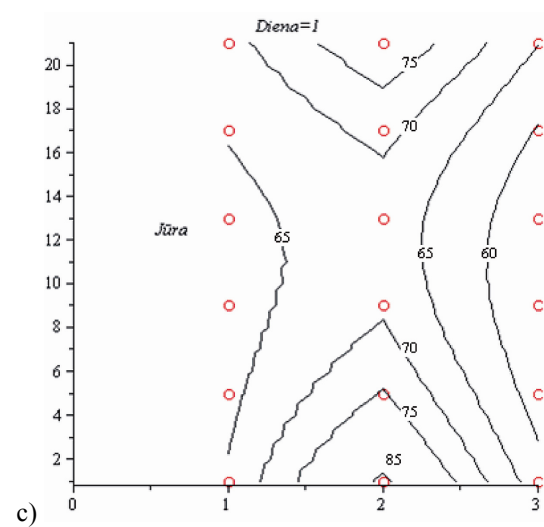
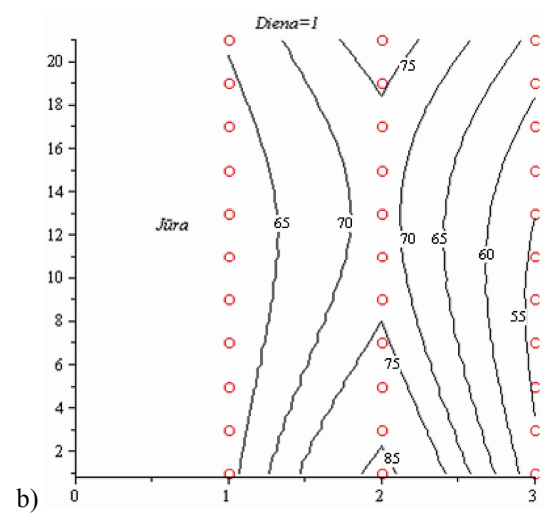
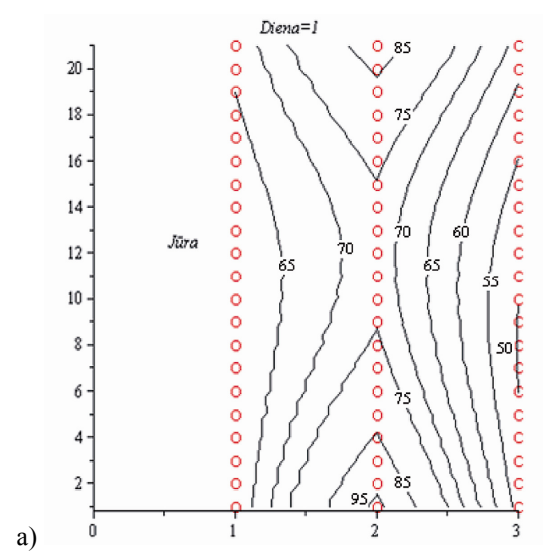
Fig. 3. Autocorrelation function in July 2 of 2008, when equivalent dose rate was measured 1 meter above ground surface, and 18 measurement results were used

Darbe atliktas skaitinis modeliavimas oro srautų ciklone turint tikslą palyginti rezultatus su kitų autorių duomenimis. Čia LDG laukų struktūros turi panašias formas, bet jos susilygina, esant mažesniai eksperimentinių rezultatų skaičiui. Be to, čia LDG vertės padidėja teritorijos centro link, t. y. asfalto tako link, kuri šiuo atveju galima laikyti papildomu dirbtinės kilmės jonizuojančiosios spinduliuotės šaltiniu. 1 m atstumu nuo žemės paviršiaus LDG vertės centro link auga mažiau (5 pav.).



4 pav. Lygiavertės dozės galios lauko struktūros (nSv/h) prie žemės paviršiaus 2008-07-02, kai teoriniame modelyje eksperimentinių taškų: a – 63; b – 33; c – 18

Fig. 4. Equivalent dose rate near ground surface July 2 of 2008, when: a – measurement results were used; b – 33 measurement results were used; c – 18 measurement results were used



5 pav. Lygiavertės dozės galios lauko struktūra (nSv/h) 1 m aukštyje nuo žemės paviršiaus 2008-07-02, kai teoriniame modelyje eksperimentinių taškų: a – 63; b – 33; c – 18

Fig. 5. Equivalent dose rate 1 meter above ground surface July 2 of 2008, when: a – measurement results were used; b – 33 measurement results were used; c – 18 measurement results were used

Panašios LDG laukų struktūros gautos 2008-07-10 (6 pav.), kai buvo priešinga vėjo kryptis nei 2008-07-02, o absoliutūs dydžiai buvo didesni.

LDG reikšmių skirtumą liepos 2 ir 10 d. galima paaiškinti skirtingu vėjo greičiu. Esant mažam vėjo greičiui, priemaišų pernašos intensyvumas mažėja, o radionuklidų kaupimo greitis didėja prie žemės paviršiaus.

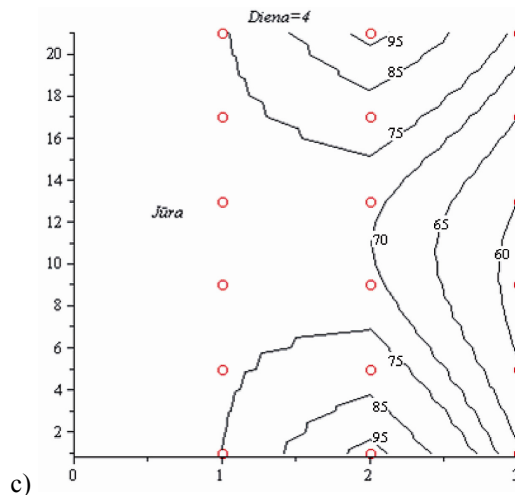
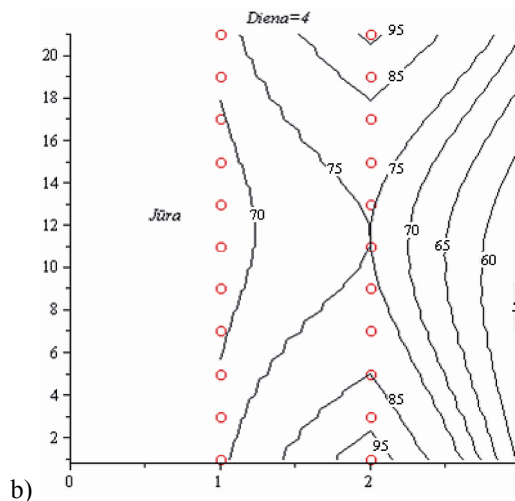
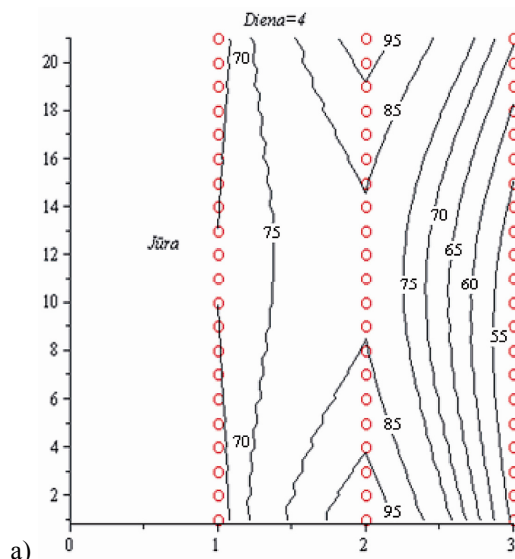
2 lentelėje pateiktas išmatuotų ir apskaičiuotų rezultatų palyginimo pavyzdys, kai teorinis modelis turėjo tik 18 eksperimentinių verčių. Čia 80 % atvejų skirtumas tarp išmatuotų ir apskaičiuotų duomenų neviršijo 15 %.

Taigi taikant optimalios interpoliacijos metodą LDG laukų identiška struktūrai įvertinti, matavimo duomenų skaičių galima kelis kartus sumažinti.

2 lentelė. Išmatuotų ir apskaičiuotų LDG reikšmių (nSv/h) 2008-07-02 1 m aukštyje nuo žemės paviršiaus palyginimas, kai teoriniame modelyje panaudota 18 eksperimentinių rezultatų (E – eksperimentas, T – teorija)

Table 2. Comparison of calculated and measured equivalent dose values (nSv/h) 1 meter above ground surface in July 2 of 2008 when 18 measurement results were used (E-experiment, T-theory)

Matavimo taško numeris	LDG pajūryje, nSv/h		LDG take, nSv/h		LDG miške, nSv/h	
	E	T	E	T	E	T
1	70	70	100	100	70	70
2	60	71	100	78	70	73
3	60	64	70	68	60	68
4	60	57	80	62	60	64
5	50	50	60	60	60	60
6	50	53	70	58	70	60
7	50	55	70	61	60	62
8	50	57	60	68	60	64
9	50	50	90	90	60	60
10	50	59	80	71	60	67
11	60	60	80	67	60	67
12	50	59	70	71	70	66
13	50	50	90	90	60	60
14	50	60	70	71	60	66
15	50	61	80	67	60	65
16	50	62	80	69	60	65
17	60	60	80	80	60	60
18	50	63	90	70	60	65
19	50	63	80	69	60	67
20	50	62	90	75	60	68
21	50	50	100	100	60	60
Vidutinė reikšmė	53	59	80	74	62	65



6 pav. Lygiavertės dozės galios lauko struktūros (nSv/h) prie žemės paviršiaus 2008-07-10, kai teoriniame modelyje eksperimentinių taškų: a – 63; b – 33; c – 18

Fig. 6. Equivalent dose rate near ground surface July 10 of 2008, when: a – measurement results were used; b – 33 measurement results were used; c – 18 measurement results were used

Išvados

1. Lygiavertės dozės galia (LDG) išmatuota Baltijos jūros priekrantėje prie Juodkrantės gyvenvietės 2008 m. liepos 2 ir 10 d.

2. Gauta LDG lauko struktūra iš 63 taškų prie žemės paviršiaus ir 1 m atstumu nuo jo: didesnės absoliučios LDG vertės buvo prie pat žemės paviršiaus. Vidutinės rezultatų ekstremalios vertės buvo 51 nSv/h ir 90 nSv/h, o atskirų matavimų – 40 nSv/h ir 130 nSv/h.

3. Pirmą kartą, taikant optimalios interpoliacijos metodą, LDG lauko struktūra apskaičiuota virš nehomogeninio paviršiaus mažoje teritorijoje. Nustatytas minimalus matavimų skaičius, kuriam esant galima atkurti LDG lauko struktūrą.

4. Identiškai LDG lauko struktūrai gauti, taikant optimalios interpoliacijos metodą, matavimų skaičius buvo sumažintas 3,5 karto ir teoriniame modelyje palikta 18 matavimo taškų.

5. Sumažinus matavimų skaičių daugiau nei 3,5 karto, atsiranda didelis skirtumas tarp teorinių ir eksperimentinių LDG verčių, ir LDG lauko struktūros atkurti nepavyksta.

Padėka

Dėkojame VGTU Matematinio modeliavimo katedros prof. dr. Jonui Kleizai už pagalbą rengiant straipsnį, taip pat straipsnio recenzentams prof. habil. dr. Donatui Butkui ir doc. dr. Astai Daunaravičienei.

Literatūra

Lebedytė, M.; Butkus, D. 2001. Equivalent dose rate in the ground level air caused by the ^{222}Rn progeny gamma radiation, *Environmental Engineering* 9(3): 153–157.

Lebedytė, M.; Butkus, D.; Morkūnas, G. 2003. Variations of the ambient dose equivalent rate in the ground level air, *Journal of Environmental Radioactivity* 64: 45–57.

doi:10.1016/S0265-931X(02)00057-7

Tyrimų vietos žemėlapis [žiūrėta 2008 m. gruodžio 1 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.maps.lt/lt/zemelapis>>.

Стыро, Д. Б. 1989. *Вопросы ядерной гидрофизики*. Ленинград: Гидрометеоиздат. 256 с.

Стыро, Б. И. 1968. *Самочистение атмосферы от радиоактивных загрязнений*. Ленинград: Гидрометеоиздат. 288 с.

CALCULATING EQUIVALENT DOSE RATE FIELD STRUCTURE APPLYING THE METHOD OF OPTIMAL INTERPOLATION IN THE BALTIC SEA COAST

D. Styra, L. J. Gustas, M. Lemežis

Summary

Equivalent dose rate measurements were carried out in the Baltic Sea coast near Juodkrantė. The measurements were performed at the ground level and 1 meter above it at 63 points within the territory of 2,0×0,2 km on 2 July 2008 and 10 July 2008 under conditions of northern and southern wind directions respectively. The extreme rates of the equivalent dose rate were 51 and 90 nSv/h respectively which means that the structure of the equivalent dose field was unhomogeneous. The method of optimal interpolation was used to calculate and evaluate the structure of the equivalent dose rate field. This method was used in 3 cases when 63, 33 and 18 numbers of measurement were carried out. The identical structures of the equivalent dose field were accepted. Using 18 measurement points, coincidence between the measured and calculated values of the equivalent dose rate was satisfactory. Difference between the measured and calculated values does not exceed 15 % in 80 % of the measurement points.

Keywords: Curonian Spit, radionuclides, equivalent dose rate, optimum interpolation method.