

UDK 528.422

OPTIMALIAUS SKAITMENINIO RELJEFO MODELIO SUDARYMO TECHNOLOGIJOS
TOBULINIMAS

Algirdas Kumetaitis, Aušra Kumetaitienė

*Geodezijos ir kadastro katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius-40, Lietuva,
el. paštas: Algirdas.Kumetaitis@bite.lt, A.Kumetaitiene@ivpk.lt**Įteikta 2004 12 14, priimta 2005 04 06*

Santrauka. Šiame darbe tirama skaitmeninio reljefo modelio tikslumo priklausomybė nuo reljefo tipo ir pasirinkto paviršiaus modeliavimo metodo. Rekomenduojama metodika paviršiui skaidyti į skirtingas reljefo kategorijas. Šis paviršiaus skaidymas į skirtingas reljefo kategorijas grindžiamas reljefo raižytumo skaičiavimu keliais etapais, įvertinant šlaitų nuolydžius, nuolydžių kryptis, reljefo kintamumą pasirinktoje teritorijoje. Atliktas tyrimas ieškant optimalaus paviršiaus modeliavimo metodo kiekvienai reljefo kategorijai. Palygintas reljefo modelių, gautų skirtingais paviršiaus modeliavimo metodais, tikslumas. Išskirti tiksliausi paviršiaus modeliavimo algoritmai. Pateikiama reljefo modelio standartinio nuokrypio preliminaraus vertinimo metodika.

Raktažodžiai: skaitmeninis reljefo modelis, fizinio žemės paviršiaus modelis, aplinkos modeliavimas.

1. Įvadas

Dabar reljefui ir kitiems ištisiniams paviršiams modeliuoti yra naudojamos dvi pagrindinės SRM duomenų struktūros: trikampių tinklas (TIN) ir taisyklingas stačiakampių tinklas [1]. Reikalavimai skaitmeniniam reljefo modeliui priklauso nuo modelio paskirties [2, 3]. Sudarytas reljefo modelis tiriamas pagal 1:10 000 mastelio žemėlapiu aukščio taškus. Analizuojant gautus rezultatus išrenkama tinkamiausia reljefo modeliavimo metodika.

Optimaliam SRM sudaryti taikant skirtingus paviršiaus modeliavimo metodus buvo parengta metodika, susidedanti iš šių etapų:

- Pagal išmatuotus aukščių taškus paprastojo kringo metodu skaičiuojamas skaitmeninis reljefo modelis [4].
- Atliekama pasirinktos teritorijos paviršiaus analizė [5], nustatomos paviršiaus charakteristikos [6], paviršius suskirstomas į teritorijas pagal skirtingas geomorfologines savybes.
- Analizuojant skirtingais metodais sudarytų reljefo modelių standartinius nuokrypius [7], kiekvienai teritorijai išrenkamas tinkamiausias paviršiaus modeliavimo metodas.
- Skaičiuojamas bendras paviršiaus modelis, sujungiant skirtingais metodais apskaičiuotus pavienių paviršiaus teritorijų skaitmeninius reljefo modelius.

2. Metodikos etapų aprašymas

Pirmuoju etapu analizuojami turimi išmatuoti paviršiaus taškai ir atrenkami taškai, kurie bus naudojami paviršiui modeliuoti, taip pat taškai, naudotini skaitmeninio paviršiaus modelio kontrolei. Atliktas

tyrimas [8] parodė, kad geriausi skaitmeninio paviršiaus modeliavimo rezultatai pasiekiami modeliavimui naudojant 80 % paviršiaus taškų ir 20 % paviršiaus taškų kontrolei. Kontrolei teritoriniu principu atrenkamas kas penktas paviršiaus taškas. Kiti taškai yra naudojami paviršiui modeliuoti. Sudarytas paviršiaus modelis yra kontroliuojamas ir tikslinamas [9], naudojant atrinktus taškus.

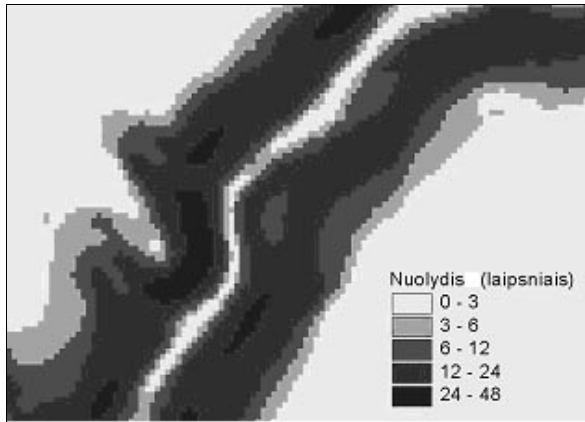
Antruoju etapu atliekama paviršiaus geomorfologinė analizė:

1. Skaičiuojamos sudaryto paviršiaus modelio šlaitų nuolydžių kryptys.

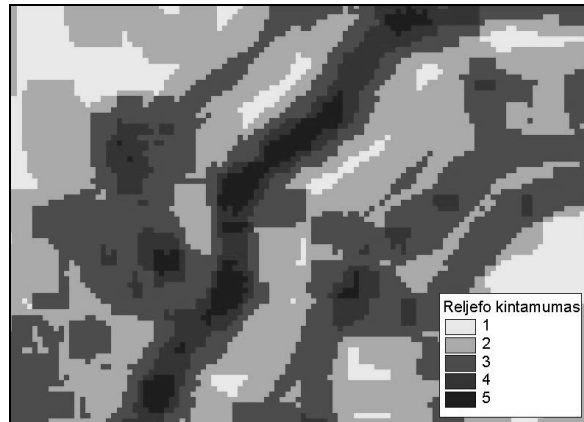
Skaitmeninis paviršius pagal nuolydžio kryptį yra skirstomas į 9 kategorijas (1 pav.): šiaurės, šiaurės rytų, rytų, pietryčių, pietų, pietvakarių, vakarų, šiaurės vakarų krypčių ir teritorijas horizontaliu paviršiumi. Skaitmeninis šlaitų krypčių modelis šioje metodikoje naudojamas kaip pagalbinė priemonė reljefo raižytumui įvertinti.



1 pav. Šlaitų krypčių sluoksnius
Fig 1. Layer of slopes directions



2 pav. Reljefo nuolydžiai
Fig 2. Relief inclinations



4 pav. Reljefo santykinis kintamumas
Fig 4. Relative variability of relief



3 pav. Šlaitų kryptių ir nuolydžių sluoksnių sankirta
Fig 3. Intersection of layers of slopes directions and inclinations



5 pav. Reljefo santykinio kintamumo ir nuolydžių sluoksnių sankirta
Fig 5. Intersection of layers of relief relative variability and inclinations

2. Skaičiuojami nuolydžių dydžiai. Atlikti tyrimai parodė, kad didžiausios reljefo modelio paklaidos kaupiasi teritorijų stačiais šlaitais regionuose. Todėl svarbu išskirti teritorijas, kurių nuolydžiai skirtingi, kad vėliau galėtume įvertinti jų įtaką modelio tikslumui kartu su reljefo kitimo duomenimis. Erdvinei sankirtai supaprastinti nagrinėjama teritorija pagal nuolydžio reikšmę skirstoma į 5 kategorijas (2 pav.).

3. Skaičiuojama šlaitų kryptių ir nuolydžių sluoksnių sankirta (3 pav.). Gaunamas žemėlapis, kuriame matomas nuolydžio kampo ir šlaito krypties kitimas. Pirmasis nuolydžio krypties ir nuolydžio kampo sankirtos geokodo skaičius rodo nuolydžio dydį (2 pav.), antrasis skaičius – nuolydžio kryptį (1 pav.).

4. Pagal šlaitų kryptių ir nuolydžių sluoksnių sankirtą skaičiuojamas santykinis reljefo kintamumas. Jis randamas skaičiuojant, kiek pasirinktame plote yra skirtingų reikšmių tinklinio modelio ląstelių, palyginti su visu modeliuojamu plotu:

$$R = \frac{n}{k} \times 100, \quad (1)$$

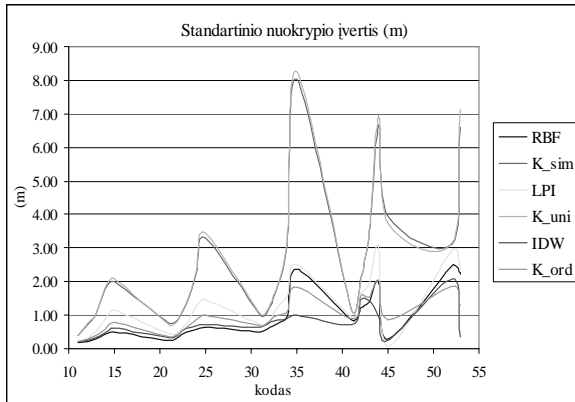
čia R – santykinis reljefo kintamumas, k – skirtingų paviršiaus reikšmių skaičius tinkliniame modelyje, n – analizuojamų ląstelių skaičius, $n=7 \times 7=49$. Tokio dydžio analizuojamas paviršiaus ląstelių masyvas buvo pasirinktas eksperimentiškai, lyginant rezultatus, gautus taikant 5×5 , 7×7 , 9×9 ląstelių dydžio kvadratus. Reljefo kintamumas skirstomas į kategorijas.

Santykinio kintamumo žemėlapis (4 pav.) rodo reljefo raižytumą, horizontaliuosius ir vertikaliuosius paviršiaus pokyčius.

5. Randama reljefo santykinio kintamumo ir nuolydžių sluoksnių sankirta (5 pav.).

Remdamiesi šia sankirta galime atlikti reljefo tyrimą ir patikrinti prielaidą, kad paviršiaus modeliavimo metodai pranašesni, kai skirtingos modeliuojamo paviršiaus formos.

Šiam tikslui naudojami M 1:1000 stereo-fotogrametriškai išmatuoti taškų aukščiai. Taško aukščio matavimo ribinė paklaida gali siekti iki 30 cm. Matavimams pasirinktas skirtingų reljefo tipų Šeškinės ozo fragmentas.



6 pav. Reljefo modelių standartinio nuokrypio įverčių pasiskirstymas reljefo kategorijose

Fig 6. Distribution of DEM standard deviations in different relief categories

Kadangi labai svarbu tiksliai įvertinti paviršiaus modeliavimo metodų tikslumą, SRM sudaryti naudojama daugiau kaip 1700 taškų, tarp kurių vidutinis atstumas yra 30 m, o daugiau kaip 3800 taškų aukščių reikšmių yra naudojamos sudarytų reljefo modelių kontrolei.

Skaitmeninis reljefo modelis buvo sudarytas keliais paviršiaus modeliavimo metodais (apskritimo spindulio funkcijos metodu, supaprastintojo, universaliojo, paprastojo kriginio metodais, lokalsios polinominės

interpoliacijos metodu, svoriniu metodu). Pagal kontrolinius taškus įvertinamas sudarytų SRM tikslumas. Pasirenkamas paprastuoju kriginio metodu sudarytas SRM. Pasirenkamas paprastasis kriginio metodas, nes atliktieji eksperimentai parodė, kad tokiu būdu sudaryti SRM geriausiai atkartoja natūralią reljefo formą [5, 8]. Pagal anksčiau aprašytą metodiką SRM yra apdorojamas bei skaičiuojama reljefo santykinio kintamumo ir nuolydžių sluoksnių sankirta. Pagal šią sankirtą randamos visų turimų reljefo modelių paklaidos kiekvienoje reljefo suskirstymo klasėje (6 pav.).

Iš lentelėje pateiktų skaičiavimų rezultatų matome, kad nė vienas reljefo modeliavimo metodas neturi pranašumo visose reljefo kategorijose. I skylyje pateikti paviršiaus modeliavimo metodai, kuriuos taikant gauti geriausiai rezultatai, o II skylyje – metodai, kurių rezultatai prastesni. Šie rezultatai dar gali būti pakoreguoti, tikslinant paviršiaus modeliavimo parametrus kiekvienai reljefo kategorijai atskirai. Iš sudarytų SRM pagal gautus tikslumo skaičiavimo rezultatus yra skaičiuojamas bendras didžiausio tikslumo SRM. Tose vietose, kur jungiasi skirtingais metodais sudaryti SRM, taikant modelių sankirtą apskaičiuojamos vidutinės paviršiaus modelio reikšmės. Geriausi SRM jungimo rezultatai pasiekti taikant svorinį metodą, kai SRM sanklotos juostos plotis lygus šešių tinklinio modelio ląstelių skersmeniui.

Skirtingų paviršiaus modeliavimo metodų tikslumo įvertinimas
Estimation of different interpolation methods for surface modelling

Taškų skaičius	Standartinio nuokrypio įvertis (m)							Min. reikšmė	Tikliausieji metodai	
	Kodas	RBF	K_sim	LPI	K_uni	IDW	K_ord		Pirmasis I	Antrasis II
136	11	0,19	0,41	0,21	0,40	0,21	0,22	0,19	RBF	IDW, LPI
554	12	0,23	0,72	0,29	0,74	0,27	0,28	0,23	RBF	IDW
769	13	0,30	0,99	0,50	1,02	0,33	0,38	0,30	RBF	IDW
139	14	0,44	1,74	0,87	1,79	0,46	0,56	0,44	RBF	IDW
44	15	0,48	2,00	1,13	2,07	0,61	0,80	0,48	RBF	IDW
40	21	0,26	0,74	0,42	0,73	0,33	0,36	0,26	RBF	IDW
396	22	0,37	0,88	0,49	0,89	0,41	0,43	0,37	RBF	IDW
607	23	0,49	1,37	0,77	1,39	0,61	0,65	0,49	RBF	IDW
138	24	0,58	2,23	1,26	2,29	0,68	0,87	0,58	RBF	IDW
41	25	0,64	3,32	1,46	3,43	0,71	1,02	0,64	RBF	IDW
69	31	0,49	0,99	0,72	1,05	0,65	0,68	0,49	RBF	IDW
345	32	0,64	1,27	0,87	1,31	0,78	0,82	0,64	RBF	IDW
356	33	0,76	1,92	1,25	1,94	0,85	1,01	0,76	RBF	IDW
65	34	0,96	3,12	1,58	3,18	0,90	1,10	0,90	IDW	RBF
15	35	2,38	8,03	2,52	8,26	1,01	1,84	1,01	IDW	K_ord
11	41	0,85	1,14	0,95	1,15	0,70	0,89	0,70	IDW	RBF
76	42	1,22	2,12	1,65	2,11	1,46	1,58	1,22	RBF	IDW
57	43	1,41	3,33	1,92	3,35	1,43	1,56	1,41	RBF	IDW
6	44	2,02	6,66	3,06	6,96	0,96	2,04	0,96	IDW	RBF
2	45	0,28	3,93	0,08	3,75	0,25	0,85	0,08	LPI	IDW
14	52	2,46	3,11	2,95	3,14	2,07	1,88	1,88	K_ord	IDW
3	53	2,22	6,61	2,38	7,13	0,35	1,28	0,35	IDW	K_ord
3884	Viso	0,89	2,57	1,24	2,64	0,73	0,96	0,65	RBF	IDW

h_{11}	h_{12}	h_{13}	h_{14}	h_{15}
h_{21}	h_{22}	h_{23}	h_{24}	h_{25}
h_{31}	h_{32}	h_{33}	h_{34}	h_{35}
h_{41}	h_{42}	h_{43}	h_{44}	h_{45}
h_{51}	h_{52}	h_{53}	h_{54}	h_{55}

7 pav. Tinklinio modelio gretimų ląstelių aukščių skirtumo skaičiavimas

Fig 7. Height differences calculation using neighborhood cells in grid model

Sudėtingo reljefo vietovėse gali būti sunku realizuoti šį uždavinį. Todėl reljefui klasifikuoti tokiose vietovėse siūlome vietoje reljefo nuolydžio parametro taikyti gretimų tinklinio modelio ląstelių aukščių vidutinius skirtumus (7 pav.). Taip pat šie sluoksniai gali būti naudojami vizualizuojant fizinio žemės paviršiaus modelį.

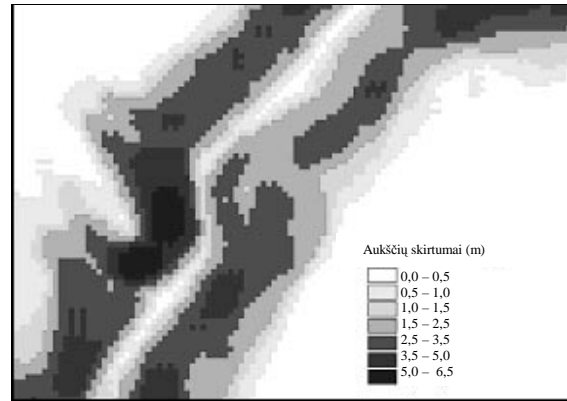
Tokiu atveju labiau tinka reljefą klasifikuoti apibendrintai, skaičiuojant ne gretimų, o tolimesnių ląstelių aukščių skirtumus pagal šią formulę:

$$\Delta h_{ij} = \frac{4h_{ij} - h_{(i-2)j} - h_{(i+2)j} - h_{i(j-2)} - h_{i(j+2)}}{4}, \quad (2)$$

čia Δh_{ij} – gretimų ląstelių aukščių skirtumas, h_{ij} – tinklinio modelio ląstelės aukštis.

Atlikti eksperimentai parodė, kad skaitmeninio reljefo modelio klasifikavimas, taikant vidutinius gretimų tinklinio modelio ląstelių aukščių skirtumus, labiau tinka reljefo modeliavimo metodui parinkti, nes gaunami labiau apibendrinti rezultatai. Paviršius yra suskirstomas į klases pagal reljefo tipą, tačiau išvengiama per smulkaus klasifikavimo, kuris apsunkina reljefo modeliavimo procesą, nes kiekvienai reljefo modelio klasei gali būti taikomas kitas reljefo modeliavimo metodas arba skirtingi reljefo modeliavimo parametrai.

Pagal aukščių skirtumus sudarytas paviršius rodo pokyčius reljefo modelyje (8 pav.).



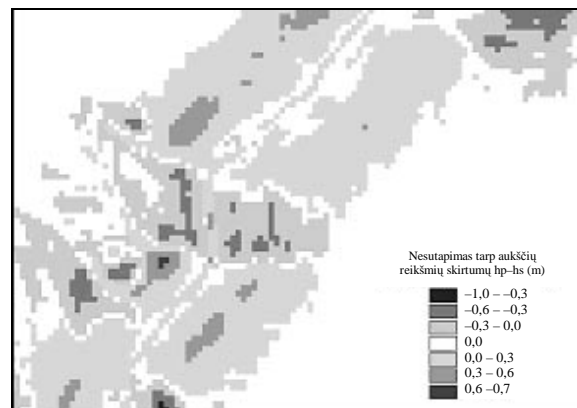
8 pav. Reljefo klasifikavimas, taikant gretimų ląstelių aukščių skirtumus

Fig 8. Relief classification applying height differences between neighbourhood cells

Skaičiavimus supaprastinti, gretimų ląstelių aukščių skirtumus gauti galima pagal apskaičiuotus nuolydžius, taikant autoriaus išvestą formulę:

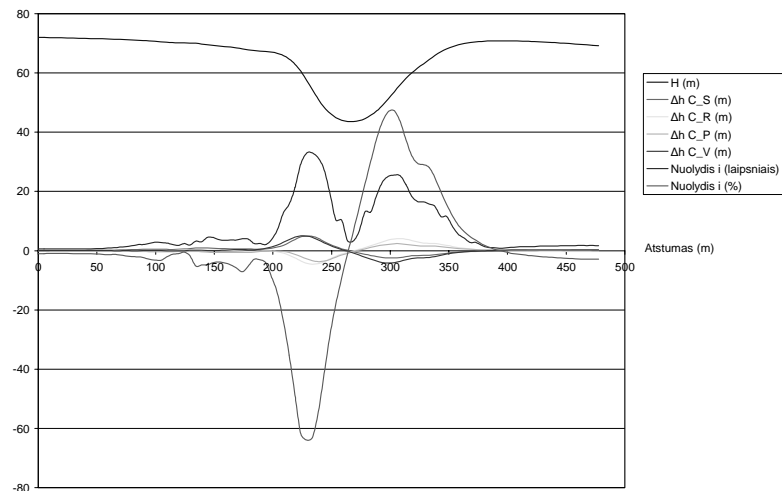
$$\Delta h = i \times \left(\frac{id}{25\sqrt{2}} - k \right), \quad (3)$$

čia i – paviršiaus nuolydis tam tikrame taške, d – tinklinio modelio ląstelės skersmuo, k – empirinis pataisos koeficientas. Tyrimai parodė, kad kai tinklinio modelio ląstelės skersmuo 5 m (9 pav.), tiksliausi rezultatai pasiekiami, esant $k = 0,026$. Tuomet esant iki 10 laipsnių nuolydžiui (8 pav.), Δh paklaida neviršija pradinių duomenų tikslumo (0,3 m), o esant statesniam nuolydžiui, siekia 0,7 m. Skaitmeninio reljefo modelio tyrimo rezultatas pateikiamas 10 pav. H – reljefo paviršiaus profilio linija, apačioje pateikiami nuolydžio kitimo grafikai laipsniais ir procentais.



9 pav. Skirtumai tarp išmatuotų ir prognozuojamų gretimų ląstelių reikšmių

Fig 9. Differences between calculated and predicted values of neighbourhood cells



10 pav. Reljefo modelio profilio aukščių skirtumų ir nuolydžio grafikas
Fig 10. Chart of DEM profile, height differences and slope

3. Išvados

Lietuvos teritorijos reljefo modelio tikslumas varijuoja pagal reljefo tipą.

Autorius parengė metodiką, skirtą optimaliam SRM, sudaryti taikant skirtingus paviršiaus modeliavimo metodus. Tiriamos teritorijos modeliavimas buvo atliktas šiais metodais: apskritimo spindulio funkcijos; supaprastinto kriginio; universaliajo kriginio; paprastojo kriginio; lokaliosios polinominės interpoliacijos; svoriniu.

Tyrimo rezultatai parodė, kad nė vienas reljefo modeliavimo metodas neturi pranašumo visose reljefo kategorijose, bet padėjo rasti optimalius metodus kiekvienai reljefo formai.

Modeliuojant paviršių stačiakampių tinklo modeliu, didžiausias tikslumas pasiektas sudarant SRM mūsų patobulintu kriginio metodu, taikant apskaičiuotus pataisos koeficientus.

Sudaryta metodika, kurią taikant didesnis reljefo modeliavimo tikslumas pasiekiamas skirstant paviršių pagal reljefo įvairovę, tad kiekvienai šių teritorijų pagal siūlomą paviršiaus analizės metodiką galima parinkti tinkamiausią paviršiaus modeliavimo metodą.

Literatūra

1. Arc/Info, Surface Modelling with TIN™ User's Guide. Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc., Redlands, CA, 1992.
2. Dėnas, Ž.; Kumetaitis, A.; Šliaupa, S.; Zakarevičius, A. Digital Model of Relief and Application of GIS for Surface Erosion Model of Lithuania. In: 33rd Symposium International „Recent Developments in Environmental Protection“, September 25–26, 2003, Vilnius, VGTU.
3. Defourny, P.; Hecquet, G.; Philippart, T. Digital terrain modelling – accuracy assessment hydrological simulation sensitivity (Ch. 7). In: Lowell K., Jaton A. (eds.). Spatial Accuracy Assessment – Land Information Uncertainty in

Natural Resources. Chelsea, MI: Ann Arbor Press, 1999, p. 61–70.

4. Wilson, J. P.; Gallant, J. C. Terrain analysis – Principles, Applications. Chichester UK & NY, Wiley, 2000. 479 p.
5. Fisher, P. F. Improved modeling of elevation error with geostatistics. *Geoinformatica*, 2 (3), 1998, p. 215–233.
6. Brabyn, L. K. Classification of macro landforms using GIS. *ITC Journal*, 1, 1997, p. 26–40.
7. Davis, J. Statistics and data analysis in geology. New York: Wiley, 1986.
8. Kumetaitis, A. Making and developing the digital elevation models by geostatistical methods. *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, Vol XXX, No 1. Vilnius: Technika, 2004, p. 29–34 (in Lithuanian).
9. Rees, W. G. The accuracy of digital elevation models interpolated to higher resolutions. *International Journal of Remote Sensing*, 21 (1), 2000, p. 7–20.

Algirdas KUMETAITIS. Engineer. UAB „Bitė GSM“, Žemaitės g. 15, LT-03504 Vilnius (Ph +370 699 00308, +370 699 23308), e-mail: taku@bite.lt.

A graduate of Vilnius Gediminas Technical University (BSc 1998, MSc, 2000).

Research interests: GIS, digital elevation modelling.

Aušra KUMETAITIENĖ. Assistant. Vilnius Gediminas Technical University. Dept of Geodesy and Cadastre. Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius-40, Lithuania (Ph +370 5 2744703, Fax 370 5 2744731).

Chief specialist. Information Society Development Committee under the Government of the Republic of Lithuania. Electronic Services and Innovations Division. Gedimino pr. 56, LT-01110 Vilnius, Lithuania (Ph +370 5 2665187, Fax 370 5 2665180), e-mail: a.kumetaitiene@ivpk.lt.

A graduate of Vilnius Gediminas Technical University (BSc 1998, MSc, 2000). Courses in Norway (1997). Research interests: digital elevation modelling, digital photogrammetry, GIS and multiparameter decision analysis.