

UDK 528.422

SKAITMENINIŲ RELJEFO MODELIŲ, SUDARYTŲ TAIKANT ĮVAIRIUS PRADINIUS DUOMENIS, TIKSLUMO TYRIMAS

Aušra Kumetaitienė

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Geodezijos ir kadastro katedra,
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius-40, Lietuva, el. paštas: a.kumetaitienė@ivpk.lt

Įteikta 2005 03 29, priimta 2005 07 07

Santrauka. Analizuojamas pradinių duomenų, turinčių tiesioginės įtakos sudaromo skaitmeninio reljefo modelio (toliau SRM) kokybei, tikslumas, padėtis ir tankis. Svarbu gauti kokybiškus aukščių duomenis, kurie atitiktų reljefo modeliui keliamus reikalavimus. Taškų skaičius turi būti pakankamai tankus, kad aukščių taškų pakaktų ne tik reljefo modeliui sudaryti, bet ir tikslumo kontrolei atlikti. Duomenų kokybinės ir kiekybinės charakteristikos bei ekonominiai rodikliai priklauso nuo pasirinkto aukščių matavimų metodo. Atliktas tyrimas, siekiant įvertinti pradinių duomenų, skirtų skaitmeniniam reljefo modeliui sudaryti, tikslumą.

Raktažodžiai: skaitmeninis reljefo modelis, tikslumas, InSAR metodas, automatinis stereofotogrametrinis metodas, stereofotogrametrinis metodas

1. Įvadas

Dabar pasaulyje plačiai naudojami iš vektorizuotų horizontalių sudaryti skaitmeniniai reljefo modeliai (SRM). Šių modelių populiarumą lemia analoginių žemėlapių gausa. Iš jų vektorizuojamos horizontalės. Lauko matavimai skaitmeniniams reljefo modeliams sudaryti netaikomi, nes yra per brangūs. Jie taikomi tik SRM kontrolei. Vis reikšmingesnis tampa SRM sudarymas distanciniais matavimų metodais. Šie matavimai skirstomi į tiesioginius (*LiDAR*, *InSAR*) ir fotogrametrinius. Modeliavimo metodais, netaikant horizontalių, pasiekama geresnė SRM kokybė. Naujai taikomos tiesioginio žemės paviršiaus matavimo technologijos leidžia reljefo modelyje sumažinti klaidų [1]. Lazerinės altimetrijos, kitaip *LiDAR* (angl. *Light distance and ranging*), matavimų metodikos tobulinimas sudaro prielaidas ateityje gauti didelės skiriamosios gebos ir tikslumo SRM [2–4], panašiai kaip jūros dugno batimetrija [5]. Radarinės interferometrijos (*InSAR* arba *IdSAR*) metodas reljefo matavimo tikslumu ir didele skiriamąja geba gali konkuruoti su optiniais reljefo matavimais [6, 7]. Interferometrija taikoma ir topografiniams poslinkiams fiksuoti, pavyzdžiui, geologinių sprūdžių teritorijose. *LiDAR* lėktuvuose montuojama lazerinė matavimų sistema atlieka 2000–5000 aukščio matavimų per sekundę ± 15 cm tikslumu. Iš šių gausių paviršiaus matavimų duomenų gali būti sudaromi didelės teritorijos 1 m skiriamosios gebos SRM [8]. Matavimų šiuo metodu sąnaudos panašios į fotogrametrinio metodo arba horizontalių vektorizavimo, o duomenų apdorojimas ir koregavimas (augmenijos ir antropogeninių objektų pašalinimas iš reljefo modelio) atsieina mažiau. Šis metodas efektyvus ir

konkurencingas. *LiDAR* metodas taip pat gali būti taikomas kartu su skaitmenine fotogrametrija tiksliems nedidelių teritorijų reljefo modeliams sudaryti.

Ir tiesioginiai, ir fotogrametriniai matavimai turi tą patį trūkumą: iš oro ne visada matomas žemės paviršius, todėl šiose vietose paviršiaus tiksliai išmatuoti neįmanoma.

Tyrimų objektu pasirinkta Lietuva, nes šioje teritorijoje SRM sudaryti taikant visus minėtuosius metodus, o straipsnio autorė atliko papildomus stereofotogrametrinius matavimus Vilniaus teritorijoje. Sudaryti keli skaitmeniniai Lietuvos teritorijos vietovės modeliai (1 lentelė). Jie skiriasi tikslumu, detalumu, paviršiaus skiriamąja geba, panaudotais pradiniais duomenimis.

1 lentelė. Lietuvos teritorijos skaitmeniniai vietovės modeliai
Table 1. The digital terrain models of Lithuania

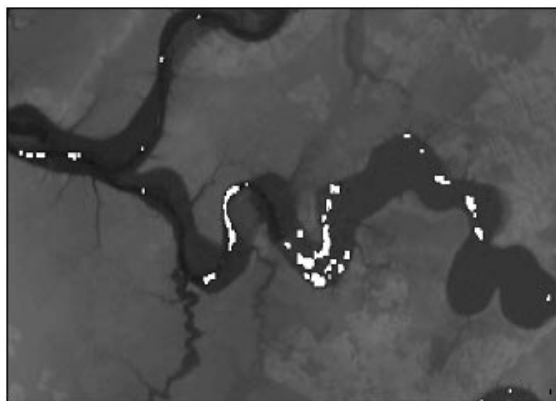
Reljefo modelis	Duomenų paruošimo metodas	Ląstelės dydis	Duomenų šaltinis
Lietuvos	<i>InSAR</i> metodas	50×50 m	distanciniai matavimai
Lietuvos	<i>Anudem</i> metodas: horizontalių interpoliavimas	50×50 m	1942 m. koordinatinių sistemos žemėlapių horizontalės
Kauno, Klaipėdos	automatinis stereofotogrametrinis	2×2 m	fotogrametriniai matavimai
Vilniaus	stereofotogrametrinis	2×2 m	stereofotogrametrinis digitalizavimas

2. Reljefo modelio, sudaryto *InSAR* metodu, tikslumo įvertinimas

Kosminio vaizdo 50 m skiriamosios gebos skaitmeninis vietovės modelis buvo sudarytas *InSAR* metodu pagal NASA programą. Šiuo metodu buvo išmatuotas visos Europos sausumos paviršius. *InSAR* metodas leidžia tiksliai išmatuoti lygaus arba nelabai kalvoto paviršiaus aukščių taškus. Tose vietose, kur žemės paviršiuje yra augmenija, išmatuojamas iš dalies ir augmenijos dengiamas paviršius, žemės paviršius, priklausomai nuo augmenijos tankumo. Vietovėse, kur dideli nuolydžiai, matavimai *InSAR* metodu ne visada įmanomi.

Straipsnio autorės atlikta SRM analizė parodė, kad šis modelis turi daug trūkumų, lemiamų paviršiaus matavimų metodo.

Pastebėta, kad sudarant skaitmeninį reljefo modelį *InSAR* metodu, lieka neišmatuota nemažai pavienių plotų giliuose upių slėniuose (1 pav.).

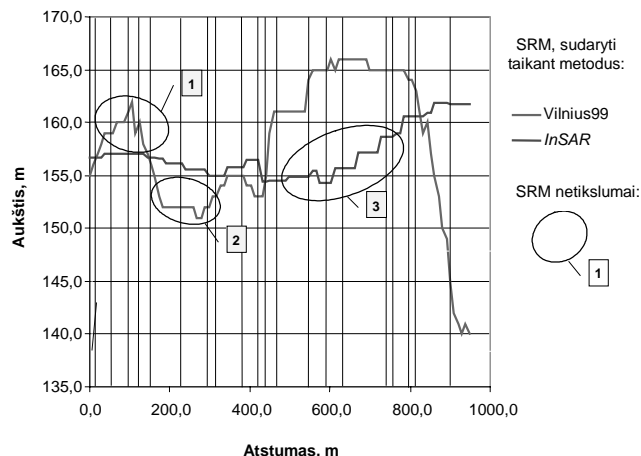


1 pav. Nemuno ir Neries santakos SRM fragmentas, sudarytas *InSAR* metodu

Fig 1. DTM fragment of Nemunas and Neris confluence, created using *InSAR* method

Neišmatuota liko 53,56 km² Lietuvos teritorijos. Šių vietovių paviršiaus duomenys gali būti gauti interpoliuojant esamus arba naudojant papildomus aukščių taškus. Atlikus skaitmeninio reljefo modelio, sudaryto *InSAR* metodu, analizę, lyginant su SRM, sudarytu netaisyklingų trikampių tinklą pavertus stačiakampiu rastru (Vilnius99), paaiškėjo, kad šis skaitmeninis paviršiaus modelis yra nelabai detalus, neatspindi smulkių reljefo detalių (2 pav. 1 ir 2 elipse pažymėtos profilio atkarpos).

Smulkūs reljefo nelygumai, matomi sudarant paviršiaus modelį iš horizontalių arba aukščio taškų, dažniausiai neišmatuojami. Taip pat dažnai praleidžiami reljefo įdubimai, vietomis reljefo modelyje matomi tikrovėje neegzistuojantys paviršiaus nelygumai (2 pav. 3 apskritimu pažymėta profilio atkarpa). Autorės nuomone, šie netikslumai galėjo atsirasti dėl netikslų matavimų staigių paviršiaus pokyčių vietose. Kreivė grafiko (2 pav.) apačioje žymi zonų, per kurias eina reljefo profilis, numerius. Kuo trumpesnė atkarpa, tuo mažesnę plotą užima nurodyta zona.



2 pav. SRM, sudaryto *InSAR* metodu, analizė
Fig 2. DTM, created using *InSAR* method analysis

Palyginus *InSAR* metodu sudarytą SRM su Vilniaus teritorijoje fotogrametriškai išmatuotomis taškų altitudėmis, standartinis nuokrypis $\sigma = 4,57$ m (2 lentelė).

2 lentelė. Skaitmeninio reljefo modelio tikslumo duomenys
Table 2. Accuracy data of DTM

SRM statistiniai duomenys	50 m / <i>InSAR</i>
Kontrolinių taškų kiekis, vnt.	3115
Vidutinis altitudžių skirtumas Δh , m	2,26
Standartinio nuokrypio įvertis σ , m	4,57
Didžiausias altitudžių skirtumas Δh_{max} , m	25,17

3. Reljefo modelio, sudaryto digitalizuojant horizontales, tikslumo analizė

Lietuvos teritorijos 50 m skiriamosios gebos skaitmeninis reljefo modelis (*DEM50*) sudarytas *Anudem* metodu iš horizontalių, kaip papildomą informaciją paviršiui modeliuoti naudojant aukščių taškus bei linijinius hidrografijos duomenis. Aukščių duomenims interpoluoti taikyta kriginio metodo. *DEM50* yra stačiakampių tinklo reljefo modelis. Tinklinį modelį sudaro ląstelių masyvas iš 5985 eilučių ir 7775 stulpelių, iš viso 46 533 375 ląstelės. *DEM50* nėra tikslus dėl kelių faktorių [9]:

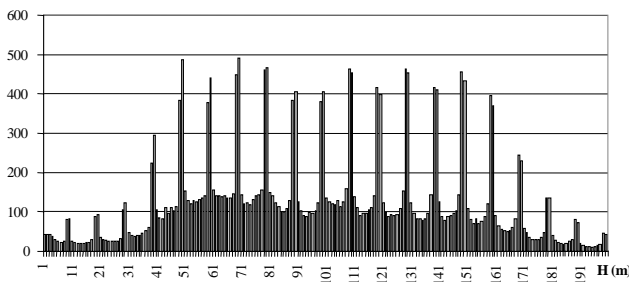
- nėra visiškai patikimų pradinių duomenų SRM sudaryti;

- paviršiaus modeliavimo metodo lemti trūkumai.

Iki šiol kartografinės medžiagos leidybai naudojamos 1942 m. koordinatų sistemoje nubraižytos horizontalės. Palyginus geodezinio pagrindo aukščių taškus bei stereodigitalizuotus aukščių taškus paaiškėjo, kad vietomis horizontalių duomenys nepatikimi.

Paviršiaus profilio analizė parodė, kad iš horizontalių sudarytas SRM neatspindi nedidelių reljefo pokyčių. Vidutiniai reljefo pokyčiai taip pat nėra detalai atvaizduojami. Tai gali būti dėl horizontalių braižymo netikslumų arba dėl pasenusių reljefo duomenų. Kitą skaitmeninio reljefo modelio trūkumą lemia paviršiaus formavimo metodas. Paviršius, suformuotas iš

Ląstelių skaičius (tūkst.)



3 pav. Skaitmeninio reljefo modelio, sudaryto iš horizontalių, histograma

Fig 3. Histogram of digital terrain model, created from height contour lines

horizontalių, esti laiptuotas. Tai matyti iš SRM paviršiaus reikšmių histogramos (3 pav.).

Modeliuojant reljefą, būtina atsižvelgti į hidrografijos objektų kranto liniją, priešingu atveju – vandens telkinių paviršius gaunamas „banguotas“. Tai labai gerai matoma Kuršių marių ir Baltijos jūros teritorijose.

Tokių paviršių galima pataisyti, šių objektų kranto liniją panaudojant kaip horizontalę, pagal kurią koreguojamas ir „išlyginamas“ vandens telkinių paviršius. Didžiausi altitudžių skirtumai (≥ 5 m) šiame reljefo modelyje kaupiasi tose vietose, kuriose dideli reljefo nuolydžiai (3 lentelė). Tai būdinga ir miškingoms raižyto reljefo vietovėms.

3 lentelė. Statistiniai reljefo modelių altitudžių skirtumų parametrai

Table 3. Statistical parameters of DTM height differences

1996 m. SRM statistiniai duomenys	Lietuvos teritorijoje	Šeškinės ozo teritorijoje Vilniuje
Kontrolinių taškų skaičius, vnt.	64451	3115
Vidutinis altitudžių skirtumas Δh , m	-0,8	-0,71
Standartinio nuokrypio įvertis σ , m	3,0	3,92
Didžiausias altitudžių skirtumas Δh_{max} , m	29,0	18,15

Atsižvelgiant į Lietuvos teritorijos reljefo pobūdį, tikslintina teritorija laikytini didžiųjų upių slėniai stačiais šlaitais. Skaitmeninis reljefo modelis tikslinamas naudojant hidrografijos taškus.

4. Automatizuotai sudaryto reljefo modelio tikslumo analizė

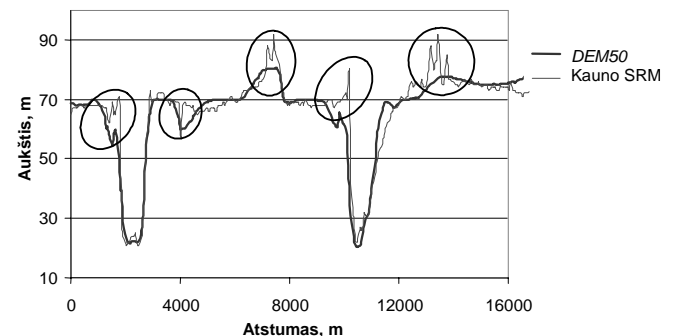
Ortofotografinio žemėlapių sudarymas susideda iš šių etapų: aerofotogrametrijos skenavimo, skaitmeninės aerotrianguliacijos, SRM sudarymo, ortofotografinio žemėlapių sudarymo bei koregavimo pagal sudarytą SRM [10]. Vienas iš būtinų ortofotografinių žemėlapių gamybos proceso etapų yra SRM sudarymas automatiniu stereofotogrametrijos metodu. Šiuo metodu reljefas

modeliuojamas naudojant sutampančias aerofotogrametrijos nuotraukas. Teorinis šiuo metodu sudaryto SRM aukščio tikslumas yra 0,3–1 ląstelės dydžio, t. y. $0,1\% H_s - 0,2\% H_s$ (H_s – skrydžio aukštis) atviroje vietovėje ir $1\% H_s - 2\% H_s$ miškingoje teritorijoje [11].

Aerogeodezijos institute automatiniu stereofotogrametrijos metodu, naudojant *Leica* darbo stotį, sudarytas Kauno 2×2 m ląstelės dydžio skaitmeninis paviršiaus modelis. Šis metodas labai perspektyvus, nes ortofotografiniai šalies žemėlapiai nuolat atnaujinami, o SRM gali būti gaunamas ortofotografinių žemėlapių gaminant – kaip papildomas produktas, kuriam nereikia atskiros aerofotogrametrijos. Todėl šis metodas gali būti taikomas norint greitai sudaryti didelės teritorijos skaitmeninį reljefo modelį.

Taip gautas modelis apima ne tik žemės paviršių, bet ir antžeminius objektus, iškilusius aukščiau žemės paviršiaus: pastatus, miškus, pavienius medžius, krūmynus (4 pav.).

Palyginę skaitmeninio reljefo modelio, gauto automatiniu stereofotogrametrijos metodu (Kauno SRM) ir SRM, sudaryto *Anudem* metodu iš horizontalių, skerspjūvio profilius, matome, kad automatiniu stereofotogrametrijos metodu sudarytas paviršiaus modelis yra labai detalus ir atspindi smulkius paviršiaus nelygumus.



4 pav. Antžeminiai objektai, atsispindintys Kauno SRM
Fig 4. Above-ground objects reflecting on Kaunas DEM

Nagrinėjamas profilis išvestas per Nemuno ir Neris upių slėnius Kauno teritorijoje. Matome, kad hidrografijos ir kitiems antžeminiams reiškiniams (pavyzdžiui, dirvos erozijai) modeliuoti toks paviršius netinka, nes apima daug antžeminių objektų (4 pav. apskritimais apibrėžtos profilio atkarpos), kurie iškraipo tikrąjį žemės paviršiaus vaizdą. Norint iš šio SRM sukurti skaitmeninį reljefo modelį, prieš tai reikia pašalinti antžeminius objektus. Tai gali būti atliekama rankiniu būdu, naudojant papildomą aukščių informaciją tų vietų, kuriose dideli paviršiaus plotai dengiami augmenijos. Kadangi operatorius gali tiksliai išmatuoti žemės paviršių, kur augalija retesnė, šiose vietose tikslinga naudoti papildomai stereodigitalizuotus aukščių taškus.

Kadangi stereofotogrametrijos matavimai Kaune nebuvo atlikti, SRM tikslumas tirtas, lyginant su didelio tikslumo SRM (ląstelės dydis 2×2 m), gautu iš 1:10 000 mastelio žemėlapių horizontalių. Kontrolei naudota 7100 aukščių taškų (4 lentelė).

4 lentelė. Statistiniai SRM tikslumo parametrai

Table 4. Statistical accuracy parameters of DTM

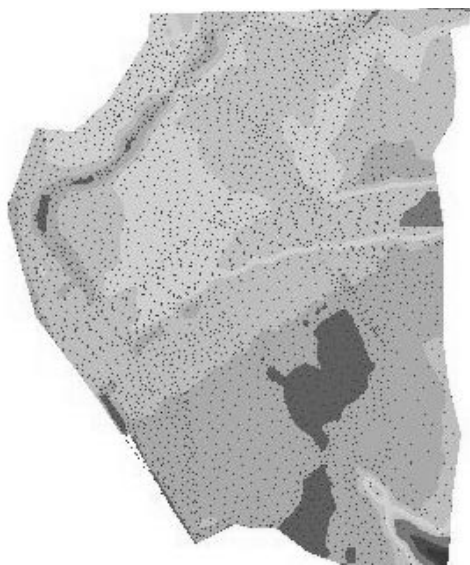
SRM statistiniai duomenys	Gauta automatinu stereofotogrametriniu metodu
Kontrolinių taškų skaičius, vnt.	7100
Vidutinis altitudžių skirtumas Δh , m	-2,94
Standartinio nuokrypio įvertis σ , m	6,23
Didžiausias altitudžių skirtumas Δh_{max} , m	26,56

5. Reljefo modelio, sudaryto stereofotogrametriniu būdu, analizė

Stereofotogrametrinių matavimų privalumas – galimybė išdėstyti taškus pagal poreikį. Stereodigitalizuodamas, priklausomai nuo reljefo situacijos, operatorius gali pasirinkti pradinių taškų išdėstymą taip, kad būtų atspindėtos svarbiausios reljefo savybės. Be to, rankinis darbas leidžia išvengti augalijos ir antropogeninių objektų patekimo į sudaromą reljefo modelį. Metodo trūkumas tai, kad rankinis darbas reikalauja daug laiko sąnaudų, todėl jis nėra labai produktyvus ir, palyginti su kitais metodais, gana brangus.

Analizuodama taikytų metodų tikslumą straipsnio autorė ištyrė Vilniaus 2 m skiriamosios gebos skaitmeninio reljefo modelio fragmentą, sudarytą naudojant stereodigitalizuotus aukščių taškus. Aukščių taškai išmatuoti stereofotogrametriniu prietaisu A8. Matavimai atlikti 121,86 km² plote Vilniaus teritorijoje. Skaitmeniniam reljefo modeliui sudaryti straipsnio autorė pasirinko Šeškinės ožą.

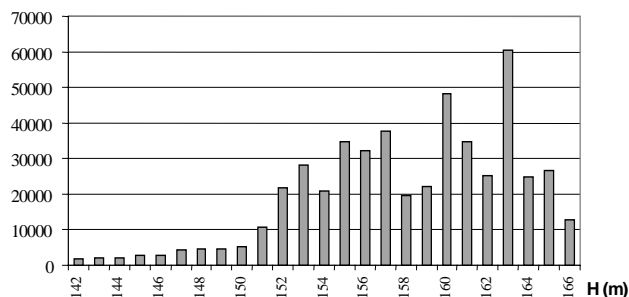
Kadangi autorė norėjo sudaryti labai tikslų SRM, buvo atliktas papildomas stereodigitalizavimas, išmatuojant 5689 charakteringuosius vietovės taškų aukščius (5 pav.).



5 pav. Vilniaus dalies reljefo modelio kontrolinių taškų išsidėstymas

Fig 5. Distribution of segment Vilnius city DTM control points

Lašelių skaičius



6 pav. SRM, sudaryto iš stereodigitalizuotų aukščių taškų, histograma

Fig 6. Histogram of digital terrain model created from stereodigitalized height points

Stereofotogrametriškai sudarytas SRM paviršius, skirtingai nei gautas interpoliuojant horizontales, kinta tolygiai (6 pav.).

Norėdama vienareikšmiškai įvertinti iš skirtingų pradinių duomenų šaltinių gautų SRM tikslumą, straipsnio autorė 2x2 m laštelės dydžio SRM perskaičiavo į 50x50 m (5 lentelė).

5 lentelė. 50x50 m laštelės dydžio SRM tikslumo duomenys

Table 5. Accuracy data of 50x50 m resolution DTM

Statistiniai duomenys	Šeškinės ozo teritorijoje Vilniuje
Kontrolinių taškų skaičius, vnt.	3115
Vidutinis altitudžių skirtumas Δh , m	0,74
Standartinio nuokrypio įvertis σ , m	1,89
Didžiausias altitudžių skirtumas Δh_{max} , m	14,46

Taip gautas SRM palygintas su stereofotogrametriškai išmatuotais aukščių taškais.

6. Išvados

1. Palyginus skaitmeninius reljefo modelius, sudarytus iš skirtingų pradinių duomenų, galima daryti išvadą, kad iš stereofotogrametrinių matavimo duomenų gautas SRM yra tiksliausias ir patikimiausias. Iširtas SRM, sudaryto iš stereofotogrametriškai išmatuotų taškų, tikslumas ($\sigma = 1,89$ m). SRM laštelės dydis (50x50 m) buvo suvienodintas su SRM modelio, gauto iš *InSAR* ir horizontalių, duomenimis

2. Perspektyvu paviršius sudaryti automatinu stereofotogrametriniu metodu, naudojant *Leica* ir panašias automatines darbo stotis, tačiau šiuo būdu gauti paviršiaus modeliai esti „užteršti“ antžeminių objektų. Būtina toliau paviršiaus modelį koreguoti, naudojant papildomus aukščių duomenis urbanizuotose ir apželdintose teritorijose. Palyginus SRM, sudarytą automatinu stereofotogrametriniu metodu, su SRM, sudarytu iš horizontalių, gautas standartinio nuokrypio įvertis $\sigma = 6,23$ m.

3. Ištyrus automatinu stereofotogrametriniu metodu sudaryto SRM nuolydžius, matyti, kad antžeminius

objektus galima atskirti pagal paviršiaus nuolydžių reikšmes.

4. Iš horizontalių sudaryto SRM tyrimas parodė, kad didžiausi šio metodo trūkumai yra paviršiaus išsidėstymas „terasomis“ bei mažas teritorijų su staigiais reljefo pokyčiais reljefo modelio tikslumas. Šio tipo reljefo modelyje būtina papildomai koreguoti hidrografijos objektų kranto linijas. SRM tikslumas iširtas imant 3115 kontrolinių taškų, gautas standartinio nuokrypio įvertis $\sigma = 3,92$ m.

5. *InSAR* metodu sudaryto reljefo modelio tikslumas – $\sigma = 4,57$ m. Atliktas tyrimas parodė, kad šiuo metodu sudarytas reljefo modelis yra „užterštas“ antžeminių objektų, paviršius lieka neišmatuotas staigių reljefo pokyčių vietose. Lietuvos teritorijoje neišmatuoto paviršiaus plotas yra 53,56 km².

Literatūra

1. Maune, D. F. Digital Elevation Model Technologies and Applications, the DEM Users Manual. American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, Bethesda, Maryland, 2001. 540 p.
2. Ritchie, J. C. Airborne laser altimeter measurements of landscape topography. *Remote Sensing of the Environment*, 53 (2), 1995, p. 91–96.
3. DeLoach, S. R.; Leonard, J. Making photogrammetric history. *Professional Surveyor*, 20 (4), 2000, p. 6, 8, 10.
4. Brock, J. C.; Wright, C. W.; Sallenger, A. H.; Krabill, W. B.; Swift, R. N. Basin and methods of NASA Airborne Topographic Mapper LiDAR surveys for coastal studies. *Journal of Coastal Research*, 18 (1), 2002, p. 1–13.
5. Sandwell, D. T.; Smith, W. H. F. Bathymetric estimation: Except: Satellite Altimetry and Earth Sciences. In: Fu, L. L.; Cazenave, A. (eds.), A handbook of techniques and applications. New York, Academic Press; 2001, p. 441–457.
6. Small, D. Generation of Digital elevation Models Through Spaceborne SAR Interferometry. Department of Geography, Univ. Zurich, Remote Sensing Series, 1998. 150 p.
7. Gens, R. SAR interferometry – software, data format, and data quality. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65 (12), 1999, p. 1375–1378.
8. Carter, W. E.; Shrestha, R. L.; Tuell, G.; Bloomquist, D.; Sartori, M. Airborne laser swath mapping shines new light on Earth's topography. *EOS Transactions*, 82 (46), American Geophysical Union, 2001, p. 549–550, 555.
9. Kumetaitis, A. Investigation of Accuracy of Lithuanian Digital Elevation Model. *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, Vol XXVI, No 2. Vilnius: Technika, 2000, p. 79–83 (in Lithuanian).
10. Kaczinski, R.; Ziobro, J. Digital aerial triangulation for DTM and orthophoto generation. *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32 (4), Stuttgart; 1998, p. 281–283.
11. Kaczinski, R. Digital aerial triangulation, DEM and orthophoto generation in IGIK. *Geodesy and Cartography (Geodezija ir kartografija)*, Vol XXVI No 3, Vilnius: Technika, 2000, p. 105–110 (in Lithuanian).

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, Dr 2005). Courses in Norway (1997).

Research interests: digital elevation modelling, digital photogrammetry, GIS and multiparameter decision analysis.