

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības fakultāte
Transportbūvju institūts

RIGA TECHNICAL UNIVERSITY

Faculty of Civil Engineering
Institute of Transport Structures

Inese JANPAULE

Doktora studiju programmas „Būvniecība” doktorante
PhD student of doctoral program „Construction”

**AUGSTAS PRECIZITĀTES LATVIJAS ĢEOĪDA
MODEĻA NOTEIKŠANAS METODES**

Promocijas darba KOPSAVILKUMS

Dr. sc. ing. zinātniskā grāda iegūšanai Būvzinātnes nozarē,
Ģeodēzijas un ģeoinformātikas apakšnozarē (RTU P-06)

**METHODS FOR THE DETERMINATION OF
HIGH PRECISION LATVIAN GEOID MODEL**

SUMMARY of the Doctoral Thesis

to Obtain the Degree of Dr. sc. ing. in Construction Science,
Geodesy and Geoinformatics (RTU P-06)

Zinātniskais vadītājs / Scientific supervisor:
Prof., Dr. phys. Jānis BALODIS

Rīga 2014

UDK 528.21 (474.3) (043.2)

Ja 598 a

Janpaule I. Augstas precizitātes Latvijas ģeoīda modeļa noteikšanas metodes.

Promocijas darba kopsavilkums. –

R.: RTU, 2014. – 61 lpp.

Janpaule I. Methods for the determination of high precision Latvian geoid model.

Summary of the doctoral thesis. –

R.: RTU, 2014. – 61 p.

Iespiests saskaņā ar RTU Būvniecības fakultātes Ģeomātikas katedras 2013. gada 11. oktobra lēmumu, protokols Nr. 229/12.

Printed according to RTU Civil Engineering faculty, Department of Geomatics decision, protocol No 229/12 dated October 11, 2013.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā
«Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai»

This work has been supported by the European Social Fund within the project
«Support for the implementation of doctoral studies
at Riga Technical University».

ISBN 978-9934-10-528-9

VISPĀRĒJĀ INFORMĀCIJA

Promocijas darbs izstrādāts Rīgas Tehniskās universitātes, Būvniecības fakultātes, Ģeomātikas katedrā laika posmā no 2009. gada līdz 2013. gadam. Finansiālais atbalsts no Eiropas Sociālā fonda (līguma Nr.: 2009/0144/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/005).

Oficiālie recenzenti:

Dr.sc.ing. **Artu ELLMANN**, Tallinas Tehnoloģiju universitātes Transporta departamenta Ģeodēzijas katedras vadītājs, profesors;

Dr.sc.ing. **Eimuntas PARŠELIŪNAS**, Viļņas Gedemina Tehniskās universitātes Ģeodēzijas un kadastra katedras profesors;

Dr.sc.ing. **Modris DOBELIS**, Rīgas Tehniskās universitātes Datorizētās inženiergrafikas katedras vadītājs, profesors.

Promocijas padomes RTU P-06 sastāvs:

Dr.sc.ing. Diāna BAJĀRE, promocijas padomes sekretāre;

Dr.habil.sc.ing. Jānis BRAUNS;

Dr.sc.ing. Andris ČATE;

Dr.sc.ing. Modris DOBELIS;

Dr.habil.sc.ing. Juris JANSONS;

Dr.sc.ing. Jānis KAMINSKIS;

Dr.sc.ing. Juris Rihards NAUDŽUNS;

Dr.sc.ing. Ainārs PAEGLĪTIS;

Dr.sc.ing. Ivars RADINŠ;

Dr.habil.sc.ing. Kārlis ROCĒNS, promocijas padomes priekšsēdētājs;

Dr.sc.ing. Dmitrijs SERDJUKS;

Dr.sc.ing. Juris SMIRNOVS.

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2014.g. 11. aprīlī plkst. 14:15 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības fakultātē, Āzenes ielā 16, sēžu zālē.

Ar promocijas darbu un kopsavilkumu iespējams iepazīties RTU Zinātniskajā bibliotēkā Ķīpsalas ielā 10 un tiešsaistē [http://www.rtu.lv/sadaļa „Zinatne”](http://www.rtu.lv/sadaļa/Zinatne).

GENERAL INFORMATION

The doctoral thesis was developed at the Department of Geomatics, Faculty of Civil Engineering, Riga Technical University from 2009 to 2013. It was financially supported by the European Social Fund (contract No: 2009/0144/1DP/ 1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/005).

Official reviewers:

Dr.sc.ing. **Artu ELLMANN**, professor, chair of Geodesy of the Department of Transportation in Tallin University of Technology;

Dr.sc.ing. **Eimuntas PARŠELIŪNAS**, professor of the Department of Geodesy and Cadastre in Vilnius Gediminas Technical University;

Dr.sc.ing. **Modris DOBELIS**, professor, head of the Department of Computer Aided Engineering Graphics in Riga Technical University.

Promotion board of RTU P-06:

Dr.sc.ing. Diana BAJARE, secretary of promotion board;

Dr.habil.sc.ing. Janis BRAUNS;

Dr.sc.ing. Andris CATE;

Dr.sc.ing. Modris DOBELIS;

Dr.habil.sc.ing. Juris JANSONS;

Dr.sc.ing. Janis KAMINSKIS;

Dr.sc.ing. Juris Rihards NAUDZUNS;

Dr.sc.ing. Ainars PAEGLITIS;

Dr.sc.ing. Ivars RADINS;

Dr.habil.sc.ing. Karlis ROCENS, chairman of promotion board;

Dr.sc.ing. Dmitrijs SERDJUKS;

Dr.sc.ing. Juris SMIRNOVS.

The defence of the thesis will take place in the public meeting on April 11, 2014 at 14:15, in the Assembly Hall at the Faculty of Civil Engineering of Riga Technical University, 16 Azenes Str., Riga, Latvia .

The thesis and the summary of thesis are available at the RTU Scientific Library, 10 Kipsalas Str., Riga and online <http://www.rtu.lv/> section „Research”.

KOPSAVILKUMA SATURS / CONTENTS OF SUMMARY

VISPĀRĒJĀ INFORMĀCIJA	3
GENERAL INFORMATION.....	4
DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	7
Tēmas aktualitāte un problēmas nostādne.....	7
Darba mērķis un uzdevumi.....	8
Pētījuma zinātniskā novitāte.....	9
Promocijas darba praktiskais nozīmīgums	9
Pētīšanas metodika un pielietotie materiāli	10
Pētījumu teorētiskā un metodoloģiskā bāze	10
Iegūto rezultātu pielietojumu robežas	11
Aizstāvēšanai izvirzītie darba rezultāti.....	11
Promocijas darba sastāvs un apjoms	11
Darbā iegūto rezultātu aprobācija.....	12
Publikāciju saraksts	14
PROMOCIJAS DARBA SATURS	16
Globālie Zemes gravitācijas lauka modeļi.....	16
KTH ģeoīda aprēķinu metode	18
DFHRS ģeoīda aprēķinu metode.....	19
Astroģeodēziskās metodes	21
Digitālo zenītteleskopu uzbūves pamatprincipi.....	22
Digitālā zenītteleskopa montāžas modelis.....	24
SECINĀJUMI	27
GENERAL REVIEW OF THE THESIS.....	29
Subject Topicality and Formulation of the Problem.....	29
Objective and Tasks of the Thesis.....	30
The Scientific Novelty of the Work	31

Practical Application of the Thesis	31
The Methodology of the Research	32
Theoretical and Methodological Bases of the Research	33
Scope of the Study	33
Results Presented for the Defense.....	33
Structure and Volume of the Doctoral Thesis.....	34
The Approbation of the Results	34
List of the Scientific Publications on the Topic of the Thesis.....	37
CONTENT OF THE DOCTORAL THESIS	39
Global Earth’s Gravity Field Models.....	39
KTH Geoid Model Computation Method	40
DFHRS Geoid Model Computation Method	42
Astrogeodetic Methods	43
Basic Principles of Digital Zenith Telescopes	45
Mount Model of Digital Zenith Telescope.....	47
CONCLUSIONS	50
PROMOCIJAS DARBA LITERATŪRAS ATSAUCES / LIST OF	
REFERENCES OF THE THESIS	52
Par promocijas darba autori	60
About the Author	60

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte un problēmas nostādne

Mūsdienās daudzās nozarēs nepieciešama precīzo koordinātu noteikšana, tāpēc lielu nozīmi ieņem GNSS (Globālās navigācijas satelītu sistēmas). Daudzās pasaules valstīs tiek izveidoti un uzlaboti augstas precizitātes globālie un reģionālie GNSS tīkli. Arī Latvijā ir izveidoti LATPOS un EUPOS[®]-Rīga GNSS tīkli. Bet, tā kā GNSS nodrošina tikai augstumu h noteikšanu virs matemātiski noteiktā Zemes elipsoīda, bet tradicionāli lieto augstumu virs pieņemtā vidējā jūras līmeņa, tad ir nepieciešams iegūt arī augstas precizitātes normālos augstumus H . Lai tos noteiktu, ir nepieciešams veikt elipsoidālo augstumu h transformāciju uz normālo augstumu virs jūras līmeņa $H = h - N$, t.i. virs ģeoīda (N – dotās vietas ģeoīda augstums virs elipsoīda). Šī transformācija, lai sasniegtu augstu precizitāti, rada nepieciešamību pēc augstas precizitātes ģeoīda modeļa. Ģeoīds ir gravitācijas lauka ekvipotenciāla virsma. Šo virsmu var vizualizēt kā okeānu virsmu miera stāvoklī, turpinātu zem kontinentiem, tādā veidā identificējot Zemes matemātisko vienāda Zemes pievilkšanas spēka figūru – ģeoīdu.

Šobrīd Latvijas gravimetriskā ģeoīda modeļa LV'98 precizitāte sasniedz 6-8 centimetrus [56]. Šo modeli 1998.gadā ir izveidojis Dr.sc.ing. Jānis Kaminskis, izmantojot PSRS laiku kartēs attēlotos gravimetrisko mērījumu datus un Dānijā izstrādātajā programmatūrā lietoto metodi. Tas bija ļoti nozīmīgs sasniegums Latvijas ģeodēzijai, jo tas ir pirmais un līdz šim vienīgais oficiālais Latvijas ģeoīda modelis. Tomēr līdz ar GNSS metodes lietošanas masveidību Latvijas tautsaimniecībā izvirzās jauni uzdevumi un jaunas precizitātes prasības. Kopš LV'98 izveides ir pagājuši 15 gadi, un šī Latvijas ģeoīda modeļa precizitāte vairs nav adekvāta GNSS mērījumu precizitātei un plašo pielietojumu masveidībai. Ir izveidojusies vajadzība pēc precīzāka ģeoīda modeļa operatīvai normālā augstuma noteikšanai, lietojot precīzās GNSS koordinātu noteikšanas metodes. To nosaka augstās precizitātes prasības būvniecībā, ģeodēzijā, kadastrā un citās nozarēs. Arī, lai tuvinātos Eiropas Vertikālās atbalsta sistēmas (EVRS) prasībām, precīzs ģeoīda modelis ir ļoti aktuāls. Jau šobrīd norisinās Latvijas augstumu sistēmas pāreja no BAS-77 (Baltijas Augstumu sistēma) uz EVRS2007 sistēmu [117].

Pēdējo gadu Nacionālās aeronautikas un kosmosa administrācijas (NASA) un Eiropas Kosmosa aģentūras (ESA) zinātnisko Zemes gravitācijas lauka pētījumu rezultātā ir izstrādāti jauni globālā Zemes gravitācijas lauka modeļi (GGM). Nacionālo ģeoīda modeļu izveidei lietoti gan gravitācijas

satelītu misiju (GRACE, GOCE u.c) dati, gan uz Zemes veikto gravimetrisko mērījumu dati, bet dažās valstīs arī ar astroģeodēziskām metodēm noteiktās vertikāles novirzes. Astroģeodēziskie dati dod iespēju ģeoīda modeļa kontrolei un detalizētai precizēšanai. Lielu ieguldījumu gravimetrisko mērījumu veikšanā ir izdarījusi Latvijas Ģeotelpiskās Informācijas aģentūra (LGIA). Tomēr, neskatoties uz to, ka jau ir veikts ievērojams daudzums gravimetrisko mērījumu, ir nepieciešams vēl ļoti liels mērījumu apjoms, lai veiktu Latvijas ģeodēzijai nepieciešamos ģeoīda uzlabojumus.

Astroģeodēziskās metodes ir pazīstamas jau kopš 20. gadsimta vidus, tomēr sākotnēji tās neguva plašu atzinību, jo augstvērtīgu datu ieguve un apstrāde bija lēns un darbietilpīgs process. Pēdējās desmitgadēs, parādoties lādiņsaites matricas (CCD) attēlu iegūšanas tehnoloģijām, šīs metodes ir aktualizējušās. Šveices un Vācijas kopdarbā ir veikti sekmīgi pētījumi, ka pateicoties jaunajām attēlu iegūšanas metodēm un jaunizveidotajiem milzīga apjoma kosmiskās ieguves zvaigžņu katalogiem, astroģeodēziskās metodes dod ātrāku rezultātu ar mazāku mērījumu skaitu, nekā gravimetriskās metodes [32] [36] [37] [38]. Lai šīs metodes izmantotu un izvērstu astroģeodēzisko vertikāles noviržu mērījumus, Latvijas ģeoīda precizitātes uzlabošanai, būtu nepieciešams veikt vertikāles novirzes mērījumus arī Latvijas teritorijā.

Darba mērķis un uzdevumi

Iegūt zinātnisku pētījumu rezultātus par jauna paaugstinātas precizitātes Latvijas nacionālā ģeoīda modeļa izstrādes iespējām, lietojot dažādas metodes un dažādas datu kopas – globālo Zemes gravitācijas lauka modeļu, gravimetriskās, GNSS/nivelēšanas un astroģeodēziskās.

Lai sasniegtu darba mērķi, ir izvirzīti šādi darba uzdevumi:

1) Jaunāko globālo gravitācijas lauka modeļu lietošanas iespēju izpēte un analīze Latvijas nacionālā ģeoīda modeļa uzlabošanai.

2) Pētījums par Stokholmas Karaliskā Tehnoloģiju institūta (KTH) gravimetriskās metodes izmantošanu Latvijas apstākļiem un rezultātu analīze.

3) Jauna Latvijas ģeoīda modeļa izstrāde, lietojot Digitālās galīgo elementu augstuma referencvirsmas (DFHRS) metodi, rezultātu analīze.

4) Astroģeodēziskā metode un tās lietošanas iespēju analīze. Digitālā zenītteleskopa optikas un teleskopa prototipa izstrāde. Eksperimentālo vertikāles novirzes mērījumu analīze.

Pētījuma zinātniskā novitāte

Jauns Latvijas ģeoīda modelis ar 1.6 cm vidējo kvadrātisko kļūdu, kas ir nozīmīgi augstāka precizitāte. Ar to pierādīts, ka DFHRS metode dod labākos rezultātus. Paplašinot GNSS mērījumu piesaisti visam 1.klases nivelēšanas tīklam, rodas reālas iespējas paaugstināt Latvijas ģeoīda modeļa precizitāti.

Gravimetriskais ģeoīda modelis ar KTH metodi uzrāda zemākas precizitātes rezultātus gan visai Latvijas teritorijai, izmantojot PSRS laika digitizētus gravitācijas anomāliju datus, gan Rīgas reģionam, izmantojot Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūras aktuālākos gravimetrisko mērījumu datus. Jāsecina, ka gravimetrisko mērījumu blīvums Latvijā vēl nav pietiekošs.

Latvijas ģeoīda modeļa precizitātes uzlabošanai ar astroģeodēzisko metodi pirmo reizi tiks izmantoti digitālā zenītteleskopa vertikāles noviržu mērījumu dati. Šie dati tiks izmantoti, līdzko tiks iegūts minimāls digitālā zenītteleskopa mērījumu datu daudzums. Šīs jaunākās metodes agrākos Latvijas ģeoīda modeļa aprēķinos nav izmantotas.

Promocijas darba praktiskais nozīmīgums

Izmantojot DFHRS metodi, izstrādāts jauns Latvijas ģeoīda modelis ar 1.6 cm vidējo kvadrātisko kļūdu.

Apskatītas globālo Zemes gravitācijas lauka modeļu lietošanas iespējas, kā rezultātā veikts vertikāles noviržu aprēķins Latvijas teritorijai, izmantojot globālo Zemes gravitācijas lauka modeļu datus.

Izmantojot KTH metodi, izveidots gravimetriskais ģeoīda modelis visai Latvijas teritorijai, veikti aprēķini eksperimentējot ar ievades datiem un parametriem.

Izmantojot KTH metodi, pamatojoties uz jaunākajiem gravimetrisko mērījumu un globālo Zemes gravitācijas lauka modeļu datiem izveidots gravimetriskais ģeoīda modelis Rīgas reģiona teritorijai.

Izstrādāts digitālā zenītteleskopa prototips un datu apstrādes algoritms.

Izstrādātā oriģinālā optikas shēma zenītteleskopa prototipam nodrošina difrakcijas izšķiršanas spēju pa visu redzeslauku.

Pētīšanas metodika un pielietotie materiāli

Promocijas darba pētījumos ģeoīda modeļa aprēķināšanai izmantotas divas dažādas metodes, attiecīgi lietojot divas dažādas ievaddatu kopas. DFHRS metode tika izmantota visas Latvijas teritorijas ģeoīda modeļa aprēķiniem. Iegūtajam rezultātam tika veikta kvalitātes kontrole, izmantojot aprēķinos neiekļautus 1. un 2. klases nivelēšanas punktu datus. KTH metode tika izmantota eksperimentāliem gravimetriskā Latvijas un Rīgas reģiona ģeoīda modeļa aprēķiniem, tika eksperimentēts ar programmatūras parametriem un ievades datiem, augstākas precizitātes rezultāta sasniegšanai. Ar abām metodēm iegūtie rezultāti tika transformēti uz Latvijas augstumu sistēmu un salīdzināti ar esošo Latvijas ģeoīda modeli LV'98 un citiem GGM.

Ikmēneša gravitācijas lauka izmaiņu analīze veikta, izmantojot datus no *POET* interaktīvā pārlūka [119] un to interpolācijai un vizualizācijai tika izveidota programma *Matlab* vidē. Vertikāles novirzes no GGM tika aprēķinātas, izmantojot *EGMlab* programmatūru *Matlab* vidē [61] un papildinot to ar vertikāles noviržu STDEV aprēķiniem. Molodenska un Helmerta vertikāles noviržu korekciju aprēķinam tika izveidota programma *Matlab* vidē.

Eksperimentālie vertikāles noviržu novērojumi veikti, izmantojot Latvijas Universitātes Ģeodēzijas un ģeoinformātikas institūtā (LU GGI) uzbūvēto digitālā zenītteleskopa prototipu, kurā integrētas augstas precizitātes mehāniskās, GNSS, elektroniskās un optikas komponentes. Zenītteleskopa novērojumu vadībai un datu apstrādei izmantota LU GGI izstrādātā uz astronomijas un ģeodēzijas teoriju balstīta programmatūra [2]. Zvaigžņu attēlu identificēšanai izmantotas *Tycho-2* [16] un NOMAD [107] atbalsta zvaigžņu kataloga apakškopas. Atsevišķas zenītteleskopa montāžas detaļas konstruētas, rasētas un veikti to slodžu aprēķini, izmantojot *Solid Edge* programmatūru.

Pētījumu teorētiskā un metodoloģiskā bāze

Promocijas darbā veiktie pētījumi balstās uz šādām inženierzinātņu nozarēm:

- Ģeodēzija un ģeoinformātika;
- Ģeodinamika;
- Ģeodēziskā astronomija;
- Optika;
- Mehānika.

Iegūto rezultātu pielietojumu robežas

Ģeoīda modeļa dažādo versiju aprēķināšanai izmantoti ievaddati par dažādām teritorijām – gravimetriskie dati tikai par Rīgas reģionu un visu Latvijas teritoriju, un GNSS/nivelēšanas dati par visu Latvijas teritoriju. Ar DFHRS metodi iegūtais visas Latvijas ģeoīda modelis ievērojami pārsniedz LV'98 modeļa precizitāti. Precizitātes izvērtējums apliecina, ka ar DFHRS metodi iegūtā modeļa lietošana ražošanā varētu dot ievērojamu mērījumu precizitātes uzlabošanu visā Latvijas teritorijā.

Zenītteleskopa prototipa parametrus raksturo pilsētvidē eksperimentālo vertikāles novirzes mērījumu sasniedzamā precizitāte ≤ 0.2 loka sekundes, reģistrējot precīzo laiku ne sliktāk par 1 mks precizitāti, un nosakot koordinātas ar atsevišķi stāvošu GNSS uztvērēju ar 0.15-0.35 m precizitāti. Līmeņošana tiek veikta automātiski. Aparatūra kontrolē trokšņu fonu pieļaujot novērojumus tikai pie tā noteikta līmeņa. Attēla reģistrācija ilgst ≥ 0.2 sekundes.

Aizstāvēšanai izvirzītie darba rezultāti

- 1) Jauns augstas precizitātes Latvijas ģeoīda modelis.
- 2) Progresīvās astroģeodēziskās metodes lietošanai paredzētais digitālā zenītteleskopa prototips un datu apstrādes algoritms.
- 3) Oriģināla optiskā sistēma digitālā zenītteleskopa prototipam.

Promocijas darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbs sastāv no anotācijas, ievada, sešām galvenajām nodaļām, kas sadalītas apakšnodaļās, secinājumiem un literatūras saraksta.

Pirmajā nodaļā apskatīti globālie Zemes gravitācijas lauka modeļi, to plašās lietošanas iespējas, kā arī daži piemēri. Otrajā nodaļā aprakstīta KTH ģeoīda aprēķinu metode un eksperimentāli KTH metodes gravimetriskā ģeoīda aprēķini visai Latvijas teritorijai un Rīgas reģionam. Trešajā nodaļā aprakstīta DFHRS metode un Latvijas ģeoīda modeļa aprēķins un rezultāti lietojot šo metodi. Darba ceturtajā nodaļā teorētiski apskatīti astroģeodēzisko vertikāles noviržu noteikšanas pamatprincipi, kā arī astronomiskā nivelēšana. Piektajā nodaļā dots literatūras apskats par digitālo zenītkameru attīstību Eiropā pēdējās desmitgadēs, un to uzbūves tehniskajiem, optiskajiem, elektroniskajiem un programmatūras pamatprincipiem. Sestajā nodaļā aprakstīts izstrādātā digitālā zenītteleskopa montāžas modelis un veikta pirmo digitālā zenītteleskopa novērojumu analīze Latvijā.

Darbs satur 127 lappuses, 92 attēlus, 7 tabulas un literatūras sarakstu ar 121 nosaukumu. Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā.

Darbā iegūto rezultātu aprobācija

a) Ziņojumi starptautiskās un vietējās zinātniskās konferencēs:

- 1) Janpaule I. Application of KTH method for determination of Latvian geoid model // International Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies”. Riga, Latvia, 8 November, 2013.
- 2) Balodis J., Haritonova D., Janpaule I., Normand M., Silabriedis G., Zarinsjh A., Rubans A., Kalinka M., Jumare I., Lasmane I. On the geodynamics in Latvia (poster) // ESA Living Planet Symposium. Edinburgh, Great Britain, 9–13 September, 2013.
- 3) Janpaule I., Balodis J. Steps Towards improvement of Latvian geoid model // European Geosciences Union 2013, Vienna, Austria, 7-12 April, 2013.
- 4) Haritonova D., Balodis J., Janpaule I., Normand M. GNSS station displacement analysis (poster) // European Geosciences Union 2013, Vienna, Austria, 7-12 April, 2013.
- 5) Janpaule I. Latvijas (kvazi)ģeoīda aprēķini, kvalitātes novērtējums un salīdzinājums ar globālajiem gravitācijas lauka modeļiem // Latvijas Universitātes 71. konference, Astronomijas un ģeodēzijas sekcijas 2.sēde, Rīga, Latvija, 14. februāris, 2013.
- 6) Janpaule I., Balodis J., Zarinsjh. Improvement of Latvian Geoid Model using GOCE Data and Vertical Deflection Measurements (poster) // GOCE Solid Earth workshop, Enschede, Netherlands, 16-17 October, 2012.
- 7) Janpaule I. On the vertical deflection measurements for improvement of Latvian geoid model // Riga Technical University 53rd International Scientific Conference. Riga, Latvia, 11-12 October 2012.
- 8) Janpaule I., Morozova K. Combination of KTH geoid solution with GPS-levelling data // Riga Technical University 53rd International Scientific Conference. Riga, Latvia, 11-12 October 2012.
- 9) Abele M., Balodis J., Janpaule I., Normand M., Rubans A., Silabriedis G., Ubelis A., Zarinsjh A. Research Activities in Geodesy at the University of Latvia // 18th Ka and Broadband Communication Navigation and Earth Observation Conference. Ottawa, Canada, September 24-27, 2012.
- 10) Balodis J., Balodis K., Haritonova D., Janpaule I., Normand M., Silabriedis G., Plotnikov S., Rubans A., Zarinsjh A. On the height component for GNSS positioning // United Nations/Latvia Workshop on the Applications of Global Navigation Satellite Systems. Riga, Latvia, 14-18 May, 2012.

- 11) Balodis J., Janpaule I., Haritonova D., Normand M., Silabriedis G., Zarinsh A., Zvirgzds J. GNSS network time series analysis // European Geosciences Union 2012, Vienna, Austria, 22-27 April, 2012.
- 12) Balodis J., Janpaule I., Rubans A., Zarinsh A., Abele M., Ubelis A., Cekule M. Eventual Participation in GMES of Institute of Geodesy and Geoinformatics (poster) // European Geosciences Union 2012, Vienna, Austria, 22-27 April, 2012.
- 13) Janpaule I. Latvijas ģeoīda modelēšana, izmantojot KTH-Geolab programmatūru // Latvijas Universitātes 70. konference, Astronomijas un ģeodēzijas sekcijas 2.sēde, Rīga, Latvija, 9. februāris, 2012.
- 14) Balodis J., Haritonova D., Janpaule I., Morozova K., Normand M., Silabriedis, G., Zvirgzds J. GNSS Network Station's Time Series Analysis // International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-based and Ground-based Augmentation Systems and Applications. Berlin, Germany, 10-11 October, 2011.
- 15) Janpaule I. LATPOS un EUPOS-Rīga iknedēļas SINEX risinājumi // Latvijas Universitātes 69. konference, Astronomijas un ģeodēzijas sekcijas 2. sēde. Rīga, Latvija, 2011.gada 11.februāris.
- 16) Ābele M., Balodis J., Janpaule I., Rutkovska E. Zenītteleskopa optiskās sistēmas parametri pie dažādām apkārtējās vides temperatūrām // Latvijas Universitātes 69. konference, Astronomijas un ģeodēzijas sekcijas 2. sēde. Rīga, Latvija, 2011. gada 11.februāris.
- 17) Balodis J., Janpaule I., Normand M., Silabriedis G., Rubans A., Zarinsh A. Measuring of the environmental changes // Euro-eco, Das Internationale Symposium „Ökologische, Technologische und Rechtliche Aspekte der Lebensversorgung”. Hannover, Germany, 2-3 Dezember, 2010.
- 18) Balodis J., Balodis, K., Janpaule, I., Kaminskis J., Normand M., Mitrofanovs I., Plotnikovs S., Rubans A., Silabriedis G., Zvirgzds J. On road of “EUPOS[®] Contribution to GOCE Mission” // International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-based and Ground-based Augmentation Systems and Applications. Brussels, Belgium, 28-29 November, 2010.
- 19) Kaminskis J., Balodis J., Janpaule I., Normand M., Rubans A., Silabriedis G., Zvirgzds J. EUPOS Contribution to GOCE Mission // 18th Conference of the International EUPOS[®] Steering Committee. Warsaw, Poland, October 26-27, 2010.
- 20) Kaminskis J., Balodis J., Janpaule I., Normand M., Rubans A., Silabriedis G., Zvirgzds J. Evaluation of height network in Latvia // NKG General Assembly. Hønefoss, Norway, September 27-30, 2010.

- 21) Balodis J., Janpaule I., Normand M., Plotnikovs S., Rubans A., Silabriedis G., Zvirgzds J. RTK Application for Levelling Network Deformation Control // 15th General Assembly of WEGENER. Istanbul, Turkey, 14-17 September, 2010.
- 22) Balodis, J., Caunite, M., Janpaule, I., Rubans A., Silabriedis, G., Zariņš, A. EUPOS and SLR Contribution to GOCE Mission // ESA Living Planet Symposium 2010. Bergen, Norway, 29 June – 2 July, 2010.
- 23) Caunīte M., Janpaule I. Iknedēļas SINEX datnes EUPOS Kombinēšanas Centram // Rīgas Tehniskās universitātes 51. studentu zinātniskā un tehniskā konference, Ģeomātikas sekcija; Āzenes iela 16, Rīga, Latvija, 2010.gada 21.aprīlis.
- 24) Janpaule I. Bernes programmatūras ekspluatācija *Baltic Grid* virtuālās mašīnas vidē // Latvijas Universitātes 68. konference, Astronomijas un ģeodēzijas sekcijas 2. sēde; Rīga, Latvija, 2010.gada 19.februāris.
- 25) Janpaule, I., Caunite, M., Balodis, J., Silabriedis, G. *EUPOS*[®] Network Solution // International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications. Berlin, Germany, 30 November – 2nd December, 2009.
- 26) Balodis, J., Silabriedis, G., Caunite M., Janpaule, I., Balodis, K., Rubans, A., Aleksejenko, I., Otto, R., Ratkus, B., Reiniks, M., Mitrofanovs, I., Plotnikovs, S., Zvirgzds, J. *EUPOS*[®]-*RIGA* Network Elevation Analyses // International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications, Berlin, Germany, 30 November – 2nd December, 2009.

b) Patenta pieteikums:

Darba oriģinalitāti apliecina iesniegtais Latvijas Republikas patenta pieteikums Nr. P-13-45: Ābele M., Balodis J., Janpaule I. „Katadioptriska optiska sistēma ar difrakcijas izšķiršanas spēju pa visu redzeslauku”.

Publikāciju saraksts

a) Zinātniskajos žurnālos:

- 1) Janpaule I., Jager R., Younis G., Kaminskis J., Zariņš A. DFHRS-based computation of quasi-geoid of Latvia // *Geodesy and Cartography*. -2013. - Volume 39. -Issue 1, pp. 11-17 (*indeksēts SCOPUS datu bāzē*).
- 2) Abele M., Balodis J., Janpaule I., Lasmane I., Rubans A., Zariņš A. Digital Zenith Camera for Vertical Deflection Determination // *Geodesy and Cartography*. -2012. -Volume 38. -Issue 4, pp. 123-129 (*indeksēts SCOPUS datu bāzē*).

b) RTU zinātnisko rakstu krājumā:

- 3) Janpaule I. Bernes programmatūras lietošana *BALTIC GRID* virtuālās mašīnas vidē // Rīgas Tehniskās universitātes zinātniskie raksti. Geomātika. -Rīga: RTU, 2010. -11. sērija. -7. sējums. -27.-30.lpp.

c) Konferenču rakstu krājumos:

- 4) Janpaule I. Application of KTH method for determination of Latvian geoid model // Proceedings of International Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies”. Rīga, Latvia, 8 November, 2013 (*pieņemta publicēšanai*).
- 5) Balodis J., Haritonova D., Janpaule I., Normand M., Silabriedis G., Zarinsjh A., Rubans A., Kalinka M., Jumare I., Lasmane I. On the geodynamics in Latvia // Proceedings of ESA Living Planet Symposium. Edinburgh, Great Britain, 9-13 September, 2013. ISBN 978-92-9221-286-5 (*publicēts CD*).
- 6) Haritonova D., Balodis J., Janpaule I., Normand M. Displacements at the GNSS Stations // Civil Engineering '13, 4th International Scientific Conference Proceedings, Volume 4. Jelgava, Latvia, 16-17 May, 2013. ISSN 2255-7776. pp 305-309.
- 7) Abele M., Balodis J., Janpaule I., Normand M., Rubans A., Silabriedis G., Ubelis A., Zarinsjh A. Research Activities in Geodesy at the University of Latvia // Proceedings of the 18th Ka and Broadband Communication Navigation and Earth Observation Conference. Ottawa, Canada, September 24-27, 2012. pp. 91-96.
- 8) Balodis J., Haritonova D., Janpaule I., Morozova K., Normand M., Silabriedis G., Zarinsjh A., Zvirgzds J. GNSS Network Station's Time Series Analyses // Proceedings of the International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications 2011. Berlin, Germany, 10-11 October, 2011 (*pieņemta publicēšanai*).
- 9) Kaminskis J., Balodis J., Janpaule I., Normand M., Rubans A., Silabriedis G., Zvirgzds J. Evaluation of height network in Latvia // Proceedings of 16th General Assembly of the Nordic Geodetic Commission. Hønefoss, Norway, September 27-30, 2010. pp. 169-172.
- 10) Balodis J., Balodis K., Janpaule I., Kaminskis J., Normand M., Mitrofanovs I., Plotnikovs S., Rubans A., Silabriedis G., Zvirgzds J. On Road of "EUPOS[®] Contribution to GOCE Mission" // proceedings of the International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications. Brussels, Belgium, 29 - 30 November 2010. pp. 47-50.

- 11) Balodis J., Caunite M., Janpaule I., Kenyeres A., Rubans A., Silabriedis G., Rosenthal G., Zariņš A., Zvirgzds J., Abele M. EUPOS and SLR Contribution to GOCE Mission // Proceedings of ESA Living Planet Symposium. Bergen, Norway, 29 June – 2 July 2010. ISBN 978-92-9221-250-6 (*Publicēts CD*).
- 12) Janpaule, I., Caunite, M., Balodis, J., Silabriedis, G. EUPOS[®] Network Solution // Proceedings of the International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications. Berlin, Germany, 30 November – 2nd December, 2009. pp. 61-67.
- 13) Balodis, J., Silabriedis, G., Caunite M., Janpaule, I., Balodis, K., Rubans, A., Aleksejenko, I., Otto, R., Ratkus, B., Reiniks, M., Mitrofanovs, I., Plotnikovs, S., Zvirgzds, J. EUPOS[®]-RIGA Network Elevation Analyses // Proceedings of the International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications, Berlin, Germany, 30 November – 2nd December, 2009. pp. 68-72.
- 14) Abele M., Balodis J., Caunite M., Janpaule I., Rubans A., Silabriedis G., Zarinsjh A. Engineering process of SLR for LEO orbiters // Proceedings of the 16th International Laser Ranging Workshop. Poznan, Poland, 13-17 October, 2008. p. 641-643.

PROMOCIJAS DARBA SATURS

Promocijas darba ievadā ir formulēta pētījuma tēmas aktualitāte, izvirzītais mērķis un galvenie uzdevumi tā sasniegšanai, kā arī izcelta pētījuma zinātniskā novitāte, praktiskā nozīme un aizstāvēšanai izvirzītie darba rezultāti.

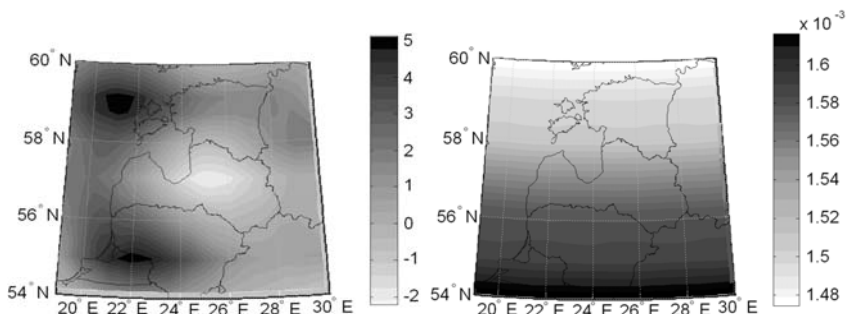
Globālie Zemes gravitācijas lauka modeļi

Nesenie satelītu misiju sasniegumi ir devuši plašākas un precīzākas zināšanas par Zemes gravitācijas lauku, tāpēc globālie Zemes gravitācijas lauka modeļi ir ieguvuši lielu nozīmi ģeozinātnēs. Tie tiek lietoti arī nacionālu un reģionālu ģeoīdu aprēķinos, kuri tiek papildināti ar lokāli veiktu mērījumu datiem.

Aiub-Grace01s [46] un Aiub-Grace02s [45] globālie Zemes gravitācijas lauka modeļi izmantoti vertikāles noviržu komponentu aprēķiniem Latvijas teritorijā, kā arī aprēķinātas šo komponentu standartnovirzes. 1.att. redzama Aiub-Grace02s globālā gravitācijas lauka modeļa, ar sfēriskās harmonijas koeficientu izvirzījuma pakāpi līdz $n=90$, vertikāles novirzes

ziemeļu-dienvidu (ZD) komponente un tās standartnovirzes Baltijas valstu teritorijā. Abas vertikāles novirzes komponentes šim reģionam mainās apmēram no -2 līdz +5 loka sekundēm un abu modeļu kartes dod līdzīgus rezultātus. Aiub-Grace02s globālā gravitācijas lauka modeļa standartnovirzes ir aptuveni 10 reizes zemākas nekā Aiub-Grace01s modelim.

Sfēriskās harmonijas koeficienti ataino Zemes gravitācijas lauka globālo struktūru un neregularitātes. Augstāku grādu koeficienti atbilst augstākai telpiskai izšķirtspējai. Realitātē gravitācijas lauku nevar noteikt ar neierobežotu telpisko izšķirtspēju, tādēļ aprēķinos nepieciešams ieviest noteiktu maksimālo sfēriskās harmonijas koeficientu izvīzījuma pakāpi.



1.att. Aiub-Grace02s GGM vertikāles novirzes ZD komponente (pa kreisi) un tās standartnovirzes (pa labi), $n=90$ [loka sekundes]

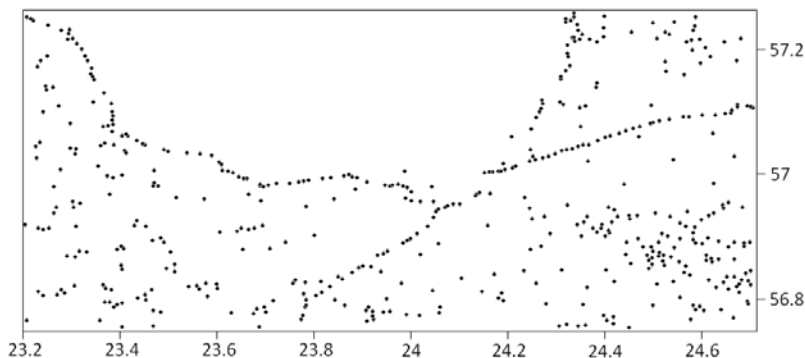
Piemērs ar vertikāles novirzes ZD komponenti Baltijas valstu teritorijā no Aiub-Grace01s globālā gravitācijas lauka modeļa ar četrām dažādām izvīzījuma pakāpēm (120, 90, 60 un 30) parāda, ka pazeminot izvīzījuma pakāpi, ievērojami samazinās arī standartnovirzes. Izvīzījuma pakāpei $n = 120$, standartnovirzes svārstās starp 0.1382 un 0.1396 loka sekundēm, $n = 90$ – starp 0.0141 un 0.0145 loka sekundēm, $n = 60$ – starp 0.00124 un 0.00143 loka sekundēm un $n = 30$ – starp 0.000095 un 0.000101 loka sekundēm. Savukārt, pazeminot koeficientu izvīzījuma pakāpi, samazinās no globālā modeļa iegūtās vertikāles novirzes komponentes izšķirtspēja.

Lai transformētu Molodenska vertikāles novirzes uz Helmerta vertikāles novīzēm, nepieciešamas divas korekcijas: normālās svērtieniskās līnijas izlieces korekcija un elipsoidālā korekcija [40]. Normālās svērtieniskās līnijas korekcija Baltijas valstu reģionā mainās no -0.02 līdz 0.04 loka sekundēm un elipsoidālā korekcija šajā reģionā mainās no -0.04 līdz +0.03 loka sekundēm.

KTH ģeoida aprēķinu metode

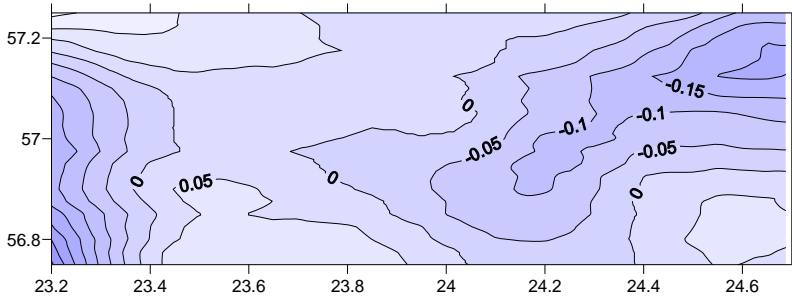
KTH ģeoida aprēķinu metode ir attīstīta Karaliskajā Tehnoloģiju institūtā (KTH) Stokholmā un balstās uz modificēto Stoksa formulu [60]. Eksperimentālos KTH metodes gravimetriskā ģeoida aprēķinos Latvijas teritorijai, sākotnēji izmantoti PSRS laika digitizētie brīvā gaisa anomāliju dati [118] un EGM2008 globālā Zemes gravitācijas lauka modeļa dati [116]. Tika veikti vairāku Latvijas teritorijas ģeoida modeļu aprēķini, mainot globālo Zemes gravitācijas lauka modeļu maksimālo sfēriskās harmonijas koeficientu izvirzījuma pakāpi (līdz 360., 180. vai 120. pakāpei) un virsmas integrācijas laukuma maksimālo sfērisko attālumu. Izmantojot šo ievades datu kopu, netika sasniegts labāks rezultāts kā ar vidējo kvadrātisko kļūdu 22.5 cm.

Izmantoti arī Latvijas Ģeotelpisko informācijas aģentūras [117] pēdējos gados veiktie gravimetrisko mērījumu rezultāti Rīgas reģionam robežās no 23°00'00'' līdz 24°54'00'' austrumu garumam un no 56°34'48'' līdz 57°24'00'' ziemeļu platumam, kuru pārklājums parādīts 2.att., un EGM2008 dati līdz 360. pakāpei, kā arī GO_CONS_GCF_2_DIR_R4 GGM dati [9] līdz 260. pakāpei.



2.att. LGIA gravimetrisko mērījumu punktu izvietojums Rīgas apkārtnē

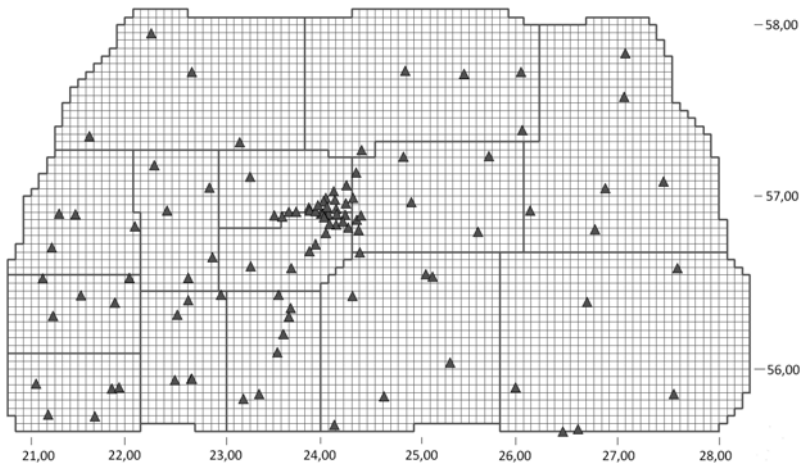
Iegūtā Rīgas reģiona ģeoida modeļa vidējā kvadrātiskā kļūda pēc GNSS/nivelēšanas punktu datiem ir 7.5 cm. Izmantojot šos jaunākos gravimetrisko mērījumu datus un 2013. gada sākumā publicētā GOCE satelīta GO_CONS_GCF_2_DIR_R4 Zemes gravitācijas lauka modeļa datus, Rīgas reģiona ģeoida modeļa vidējā kvadrātiskā kļūda ir 5 cm pēc GNSS/nivelēšanas punktu datiem. Šī modeļa salīdzinājums ar LV'98 Latvijas ģeoida modeli parādīts 3.att.



3. att. LV'98 un KTH GO_CONS_GCF_2_DIR_R ģeoida augstumu salīdzinājums risinājumiem Rīgas reģionā [m]

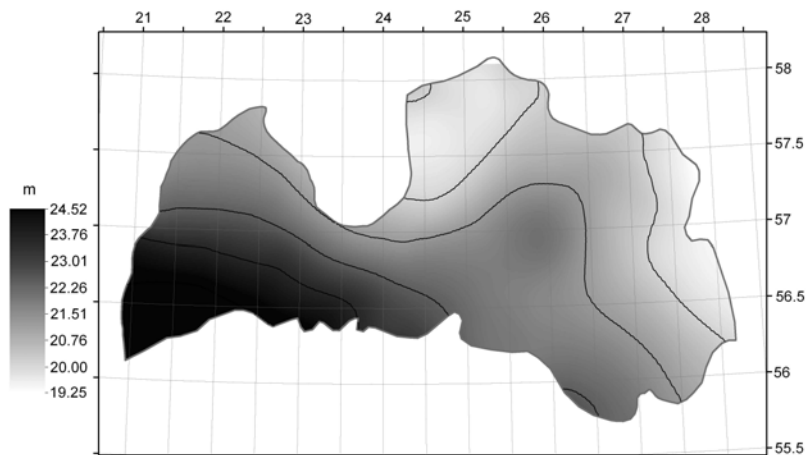
DFHRS ģeoida aprēķinu metode

Digitālā galīgo elementu augstuma referencvirsmas (DFHRS) metode izstrādāta Vācijas Karlsrūhes lietišķo zinātņu universitātē. Tā balstās uz īpaši precīzu globālu vai gravimetrisku ģeoida modeļu pielāgošanu vietējai augstumu sistēmai, ko raksturo GNSS/nivelēšanas datu kopa [114]. Šīs metodes priekšrocība ir tā, ka, variējot aprēķinu parametrus, piemēram, režģa un laukumu lielumu, ir iespējams uzlabot rezultātu pat tādā gadījumā, ja ir maz vai sliktas kvalitātes novērojumu dati.



4. att. Aprēķinu modeļa dizains Latvijas DFHRS risinājumam, tievās līnijas attēlo režģa elementus, biezas līnijas – laukumu robežas un trīsstūri – atbalsta punktus

Latvijas ģeoīda augstumu referencvirsmas aprēķinos kā ievades dati tika izmantots Eiropas gravimetriskais ģeoīda modelis EGG97. Lai nodrošinātu sistēmas definīciju, tika izmantoti 102 GNSS/nivelēšanas punktu dati. Lielākā daļa no tiem atrodas Latvijas valsts teritorijā, 2 punkti atrodas Igaunijā un 17 punkti Lietuvā, tuvu robežai ar Latviju. Plānotais režģa elementu lielums ir 5 x 5 km, kopējais režģa elementu skaits ir 4601 visam aprēķinu laukumam. Nogabalu laukumu izmēri atšķiras atkarībā no atbalsta punktu izvietojuma un blīvuma (no 80 x 40 km līdz 150 x 100 km). Katram laukumam jāietver vismaz 4 atbalsta punkti, lai nodrošinātu sistēmas definīciju. 4.att. katrā režģa elementā 25 punktiem tiek atrastas ģeoīda ondulācijas un vertikāles noviržu vērtības.



5. att. Aprēķinātā DFHRS ģeoīda augstumu referencvirsmā Latvijas teritorijai

Aprēķina rezultātā iegūtais ģeoīda augstums Latvijas teritorijā mainās no 19.20 m ziemeļrietumos līdz 24.50 m dienvidrietumos (skat. 5.att.). Iegūtā modeļa RMSE, izejot no aprēķinos izmantotajiem 102 GNSS/nivelēšanas punktiem, ir 1.6 cm.

Pieci globālie Zemes gravitācijas lauka modeļi – EGM2008 [78], EGG97 [10], Eigen05c [22], Eigen06c [23], GO_CONS_GFC_2_DIR_R3 [76] [113] transformēti, lai pielāgotu Latvijas augstumu sistēmai, un salīdzināti ar pašreiz lietošanā esošo Latvijas gravimetrisko ģeoīda modeli LV'98 un izstrādātā DFHRS modeli, kā arī ar GNSS/nivelēšanas punktu datiem. EGM2008 un EGG97 modeļiem ir vislabākā sakritība gan ar LV'98, gan ar DFHBF risinājumu, to standartnovirzes ir aptuveni 5 cm. Ar

GO_CONS_GFC_2_DIR_R3 modeli šī sakritība ir vissliktākā, šis modelis, atšķirībā no citiem, ietver tikai satelītu gravitācijas mērījumu datus.

Astroģeodēziskās metodes

Vertikāles novirzei ir divas komponentes: ziemeļu-dienvidu komponente ξ un austrumu-rietumu komponente η [43]

$$\begin{aligned}\xi &= \Phi - \varphi, \\ \eta &= (A - \lambda)\cos \varphi,\end{aligned}\quad (1)$$

kur Φ un A ir astronomiskās koordinātas, φ un λ ir elipsoidālās ģeogrāfiskās koordinātas.

Ja vertikāles novirzes ξ un η tiek tieši noteiktas no (1) vienādojumiem, salīdzinot astronomiskās un ģeodēziskās koordinātas vienam un tam pašam punktam, tad šo metodi sauc par astroģeodēzisko ģeoida noteikšanu. Astronomiskās koordinātas tiek tieši novērotas, ģeodēziskās koordinātas tiek iegūtas, izmantojot GNSS tehnoloģijas. Kā vertikāles noviržu noteikšanas galvenais instruments promocijas darbā ir apskatīts zenītteleskops.

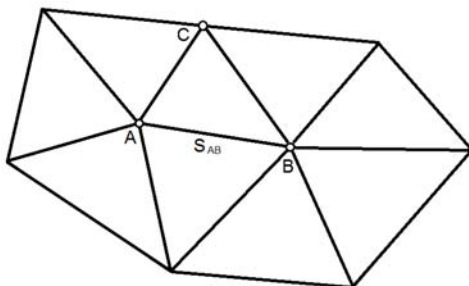
Ģeoida ondulācijas formu var noteikt, ja ir dotas vertikāles novirzes visā profila garumā, veicot astronomisko nivelēšanu. Praksē bieži tiek lietoti ziemeļu-dienvidu vai austrumu-rietumu virzienā orientēti profili. Vertikāles novirzes komponentei jābūt dotai pietiekoši daudzās profila stacijās, lai starp šīm stacijām varētu veikt ticamu interpolāciju. Pietiekami sabiezinātam astroģeodēzisko staciju tīklam ar vidējo attālumu starp stacijām 10-20 km, interpolāciju var veikt šādi:

$$\Delta N_{AB} = -\frac{\varepsilon_A + \varepsilon_B}{2} s_{AB}.\quad (2)$$

kur

$$\varepsilon = \xi \cos \alpha + \eta \sin \alpha\quad (3)$$

ir vertikāles novirzes komponente profilam AB , kura azimuts ir α [43]. Tādā veidā līnijai AB var noteikt ģeoida augstuma izmaiņas, kā arī līdzīgā veidā pārējām līnijām BC un CA trīsstūrī ABC (6.att.).



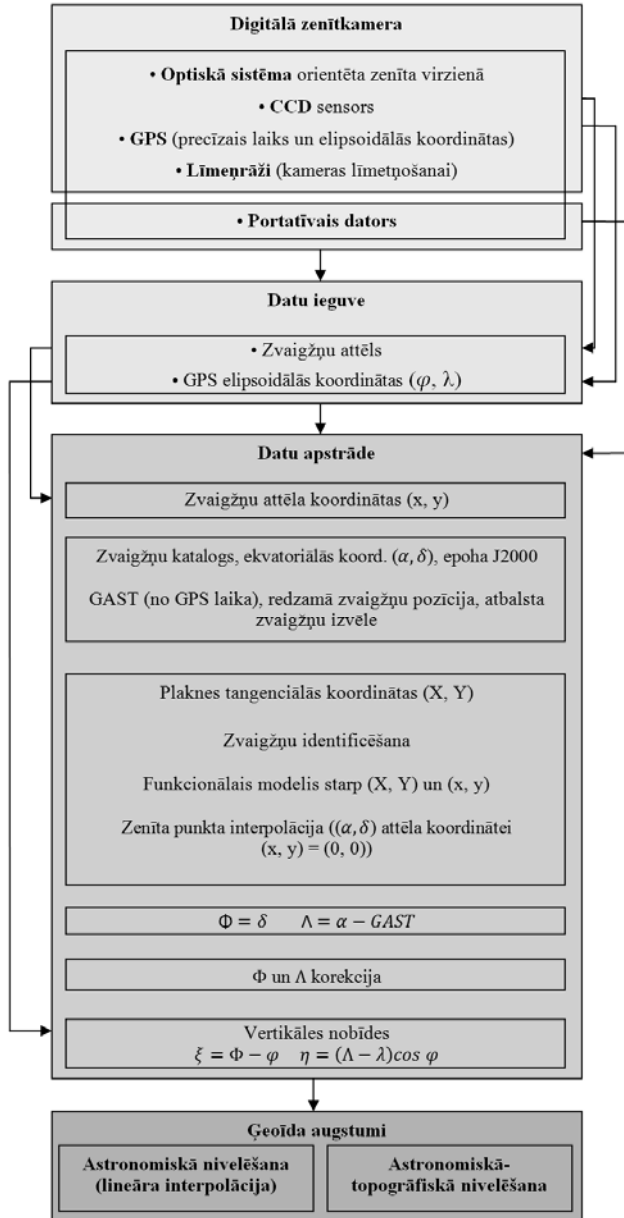
6.att. Astroģeodēziskā ģeoida triangulācijas tīkls

Pamatojoties uz iepriekš veiktiem pētījumiem par nepieciešamo vertikāles noviržu mērījumu blīvumu 1-2 cm precizitātes ģeoida noteikšanai, var aptuveni noteikt nepieciešamo vertikāles noviržu mērījumu skaitu [26]. Lai sasniegtu 1-2 cm precizitāti ģeoida projektam 1000 km² platībā, ir nepieciešami aptuveni 1000 gravimetrisko punktu, bet tikai 30 astroģeodēzisko punktu.

Digitālo zenītteleskopu uzbūves pamatprincipi

Eiropā pēdējos gados veiktas vairākas digitālo zenītteleskopu izstrādes. Kā pazīstamākās un publikācijās biežāk pieminētās ir divas, nedaudz atšķirīgas, zenītkameras sistēmas, kas tika izveidotas Ģeodēzijas institūtā, Hannoveres Universitātē - TZK2-D sistēma [41], un ETH Zurich – DIADEM sistēma [32]. Sistēma automātiskai vertikāles nobīžu noteikšanai ir izveidota arī Polijā AGH Zinātņu un Tehnoloģiju universitātē, Kalnrūpniecības mērcniecības un Vides inženierzinātņu fakultātē [63], Serbijā Būvniecības fakultātē Ģeodēzijas un ģeoinformātikas nodaļā [75], Bosfora universitātē, Stambulā, Turcijā [29] un Vīnes Tehniskajā universitātē Ģeodēzijas un ģeofizikas institūtā [25]. No pieminētajām digitālo zenītkameru sistēmām tikai divām, TZK2-D un DIADEM, ir novērtēta to precizitāte un ir iegūti rezultāti, kas ir arī publicēti.

Pārsvārā visiem digitālajiem zenītteleskopiem ir līdzīgs uzbūves pamatprincips. Digitālais zenītteleskops sastāv no optiskās sistēmas, kas orientēta zenīta virzienā, CCD sensora zvaigžņu attēlu reģistrēšanai, GNSS uztvērēja elipsoidālo koordināšu noteikšanai un precīzā laika nodrošināšanai, kā arī elektroniskajiem līmeņprāžiem svērtēniskās līnijas noteikšanai. Daturs tiek izmantots aparatūras vadībai un datu plūsmas kontrolei, kā arī tūlītējai datu apstrādei (skat. 7.att.).



7.att. Vienkāršota digitālo zenītteleskopu darbības principa shēma

Pēc zenītteleskopa līmeņošanas un fokusēšanas tiek atvērts CCD elektromehāniskais slēdzis, lai iegūtu zenīta zvaigžņu attēlu. Vienlaicīgi ar GNSS tiek mērīts laiks. Abu līmeņrāžu un CCD signāli tiek reģistrēti. Pēc tam, kad CCD attēla dati un informācija par GNSS laiku tiek pārraidīti uz datoru, zenītteleskopu rotē un datu ieguves procedūra tiek atkārtota. Vairāki attēli, iegūti no vairākām kameras pozīcijām, veido vienu novērojumu kopā ar attiecīgajām epohām un līmeņa mērījumiem. Novērojumi tiek veikti vairākos kameras virzienos, lai samazinātu CCD un līmeņrāžu nulles nobīdes ietekmi. Datu ieguvī iesaka veikt turp-atpakaļ virzienā. Šāda simetriska secība samazina sensora nobīžu lineārās variācijas, kas var rasties temperatūras izmaiņu ietekmē novērojumu laikā. Visbeidzot ar GNSS tiek noteiktas elipsoidālās koordinātas.

Digitālā zenītteleskopa montāžas modelis

Digitālā zenītteleskopa (skat. 8.att.) izstrāde uzsākta 2010.gadā Latvijas Universitātē, Ģeodēzijas un ģeoinformātikas institūtā, tā mērķis ir vertikāles noviržu noteikšana ar vēlamo precizitāti 0.1 loka sekunde [2]. Eksperimentāli novērojumi tika veikti no 2011.gada novembra līdz 2012.gada martam un to mērķis bija novērtēt optiski-mehāniskās sistēmas raksturlielumus, veikt zenīta punkta pozīcijas aprēķinus un noteikt tā precizitāti, noskaidrot novērojamo zvaigžņu raksturlielumus, veikt papildinājumus un uzlabojumus datu apstrādes programmatūrā, integrēt sistēmā attēla ekspozīcijas laika precīzas fiksācijas aprīkojumu.

Prototipa zenītkamera ir 20 cm katadioptrisks teleskops ar 1390 mm fokusa attālumu un CCD attēlu iegūšanas ierīci ar 1350x1024 kvadrātveida 6.45 mkm pikseliem, ar kuru iespējams aptvert 0.35x0.27 grādu lielu zvaigžņu lauku. Uzbūvētā prototipa optiskā sistēma ir oriģināla un tās patenta pieteikums Nr. P-13-45 „Katadioptriska optiska sistēma ar difrakcijas izšķīršanas spēju pa visu redzeslauku” 08.04.2013. iesniegts LR Patentu valdē.

Teleskops atrodas uz horizontālas pamata virsmas, to balsta trīs precizitātes gultņi, un to var rotēt ap vertikālo asi par jebkuru leņķi, izmantojot soļu motoru. Līmeņrādis ir uzmontēts uz teleskopa cilindra. Gala konstrukcijā paredzēts, ka rotējošajai daļai enerģijas avots būs baterijas un komunikācija ar datoru tiks nodrošināta ar bezvadu (WiFi) komunikācijas ierīci.

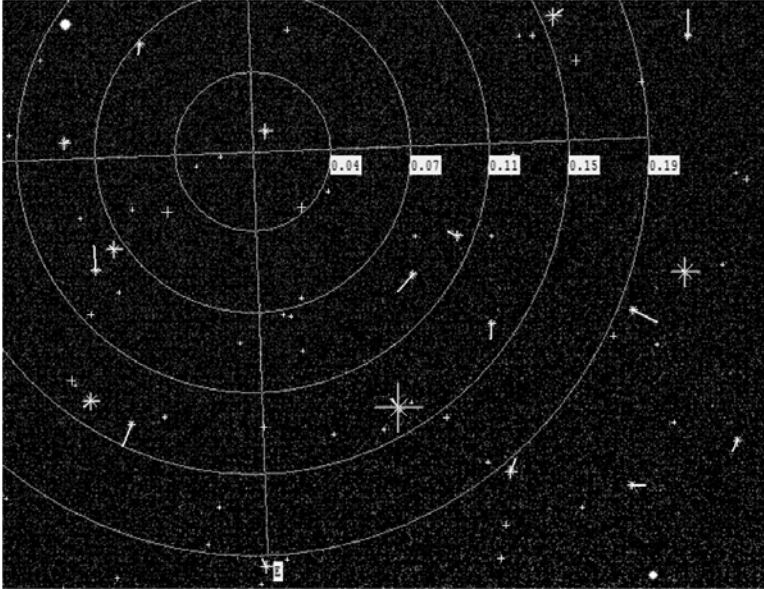
Attēli, kas iegūti ar prototipa instrumentu pilsētas centra vidē, parāda zvaigznes līdz 13^m magnitūdai pie 0.1 sekundes ekspozīcijas. Vidējais zvaigžņu skaits kadrā ir 12. Iegūto zvaigžņu attēlu laika noteikšanas precizitāte iekļaujas 10 milisekunžu robežās. Apstrādāts zenīta apgabala attēls parādīts 9.att.



8. att. Digitālās zenītkameras prototips (pa kreisi) un gala konstrukcija (pa labi)

Precīzā līmeņrāža nepārtrauktu nolasiņumu virknes RMS mainās no 2-3" iekšstelpās līdz 0.2-1" uz stabilas pamatnes pilsētā, tāpēc mērījumu iegūšanai jānotiek vietās ar minimālu fona vibrāciju ietekmi. Instrumenta pamatnes stabilitātes un rotācijas mehānisma precizitātes prasības nav pārāk stingras, ir pietiekoši, ja instrumentam ir laba stabilitāte 10-20 sekunžu laikā, kad tiek veikta attēlu iegūšana.

Ļoti augsta aparatūras jūtība noteica datu reģistrācijas apstākļus. Konstatēts un tika ņemts vērā, ka reģistrētos datus ietekmē cilvēka pārvietošanās vismaz līdz 3-4 m attālumam no instrumenta, ieliecot asfalta un bruģa segumus, arī atklātu grunti. Tas apstiprināja nepieciešamību vadības un datu pārraides kabeļus aizvietot ar bezvadu sakaru līnijām. Aparatūra jāekranē arī no vēja iedarbības. Aukstā laikā ir novērota aparatūras tuvumā esoša cilvēka izdalītā siltuma ietekme, radot atmosfēras turbulenci.



9. att. Apstrādāts zenīta apgabala attēls. Kataloga zvaigznes līdz 13^m ir parādītas kā taisni krustiņi, to lielums proporcionāls zvaigžņu magnitūdai, attēla zvaigznes – kā slīpi krustiņi, līnijas pie zvaigznēm attēlo aproksimācijas nesaistes

SECINĀJUMI

Promocijas darbā ir sniegti zinātnisko pētījumu rezultāti par Latvijas nacionālā ģeoīda modeļa augstas precizitātes sasniegšanas iespējām, izmantojot dažādas starptautiski atzītas metodes un programmatūras un, kā arī, izvērtējot esošās datu kopas gan visā Latvijas Republikas teritorijā, gan eksperimentālā apgabalā – Rīgas reģionā.

Lietojot KTH metodi gravimetriskā ģeoīda aprēķiniem visai Latvijas teritorijai, sākotnēji izmantojot PSRS laika digitizētos brīvā gaisa anomāliju un EGM2008 globālā Zemes gravitācijas lauka modeļa datus, neizdevās sasniegt labāku rezultātu kā ar vidējo kvadrātisko kļūdu 22.5 cm. Izmantojot Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūras jaunākos gravimetrisko mērījumu datus Rīgas reģionā un EGM2008 datus, rezultātā iegūtais Rīgas reģiona ģeoīda modelis ir ar labāku precizitātes rādītāju, pēc GNSS/nivelēšanas punktu datiem vidējā kvadrātiskā kļūda ir 7.5 cm. Izmantojot šos jaunākos gravimetrisko mērījumu datus un 2013.gada sākumā publicētā GOCE satelīta GO_CONS_GCF_2_DIR_R4 Zemes gravitācijas lauka modeļa datus, Rīgas reģiona ģeoīda modeļa vidējā kvadrātiskā kļūda ir 5 cm pēc GNSS/nivelēšanas punktu datiem. Tātad Rīgas reģionā Goce GO_CONS_GCF_2_DIR_R4 modeļa atbilstība ir labāka, nekā EGM2008 modelim. Jāsecina, ka vēsturisko gravimetrisko datu kvalitāte nedod iespēju aprēķināt augstas kvalitātes ģeoīdu, bet LGIA uzkrāto reālo gravimetrisko mērījumu blīvums Latvijā vēl nav pietiekošs.

DFHRS aprēķinu metode ģeoīda aprēķinam Latvijas teritorijā, pamatojoties uz GNSS/nivelēšanas datu kopu un EGG97 gravimetriskā ģeoīda modeļa datiem, ir vissekmīgākais. Rezultātā Latvijas Republikas teritorijai iegūts ģeoīda modelis ar 1.6 cm vidējo kvadrātisko kļūdu (pēc GNSS/nivelēšanas punktu datiem). Lietojot pašreiz Latvijā esošās datu kopas, DFHRS metode dod labākos rezultātus. Paplašinot GNSS mērījumu piesaisti visam I.klases nivelēšanas tīklam, rodas reālas iespējas vēl uzlabot Latvijas ģeoīda modeļa precizitāti.

Salīdzinot piecus globālos Zemes gravitācijas lauka modeļus – EGM2008, EGG97, Eigen05c, Eigen06c, GO_CONS_GFC_2_DIR_R3, kuri transformēti, lai pielāgotu Latvijas augstumu sistēmai, ar pašreiz lietošanā esošo Latvijas gravimetrisko ģeoīda modeli LV'98 un GNSS/nivelēšanas punktu datiem, var secināt, ka vislabākā atbilstība ir EGM2008 un EGG97 modeļiem, savukārt vissliktākā atbilstība ir Eigen05c un

GO_CONS_GFC_2_DIR_R3 modeļiem, jo tie balstās tikai uz satelītu mērījumu rezultātiem un to izšķirtspēja nav mazāka par 100km^2 .

Vertikāles novirzes no globālajiem Zemes gravitācijas lauka modeļiem (Molodenska vertikāles novirzes) Baltijas valstu reģionā mainās apmēram no -2 līdz +5 loka sekundēm. Korekcijas Molodenska vertikāles noviržu pārrēķinam uz astroģeodēziskajām vertikāles novirzēm uz elipsoīda ir normālās svērtieniskās līnijas korekcija, kas Baltijas valstu reģionā mainās no -0.02 līdz +0.04 loka sekundēm, un elipsoidālā korekcija, kas Baltijas valstu reģionā mainās no -0.04 līdz +0.03 loka sekundēm.

Astroģeodēziskās metodes dod iespēju noteikt vertikāles novirzes, kuras var integrēt Latvijas ģeoida noteikšanā. Lai izveidotu Latvijas ģeoidu ar 1-2 cm precizitāti, ir nepieciešami aptuveni 2000 astroģeodēzisko punktu mērījumi, savukārt šādas precizitātes gravimetriskā ģeoida noteikšanai nepieciešami vismaz ~64 500 gravimetrisko punktu mērījumi.

Latvijā uzsākta digitālā zenītteleskopa prototipa izstrāde un veikti testa mērījumi. Attēli, iegūti ar prototipa instrumentu pilsētas centra vidē, parāda zvaigznes līdz 13^{m} magnitūdai pie 0.1 sekundes ekspozīcijas. Vidējais zvaigžņu skaits kadrā ir 12. Iegūto zvaigžņu attēlu laika noteikšanas precizitāte iekļaujas 10 milisekunžu robežās. Precīzā līmeņrāža nepārtrauktu nolasījumu virknes RMS mainās no 2-3 loka sekundēm iekštelpās līdz 0.2-1 loka sekundēm uz stabilas pamatnes pilsētā, tāpēc mērījumu iegūšanai jānotiek vietās ar minimālu fona vibrāciju ietekmi. Instrumenta pamatnes stabilitātes un rotācijas mehānisma precizitātes prasības nav pārāk stingras, ir pietiekoši, ja instrumentam ir laba stabilitāte 10-20 sekunžu laikā, kad tiek veikta attēlu iegūšana. Rezultātā secināts, ka ar digitālā zenītteleskopa gala konstrukciju noteikto vertikāles noviržu sagaidāmā precizitāte būs labāka par 0.1 loka sekundi. Latvijas ģeoida modeļa precizitātes uzlabošanai ar astroģeodēzisko metodi pirmo reizi tiks izmantoti digitālā zenītteleskopa vertikāles noviržu mērījumu dati. Šie dati tiks lietoti, līdzko tiks iegūts minimāls digitālā zenītteleskopa mērījumu datu daudzums. Šīs jaunākās metodes agrākos Latvijas ģeoida modeļa aprēķinos nav izmantotas.

Aprēķināta digitālā zenītteleskopa optiskā sistēma, patentēšanai iesniegts un LR Patentu valdē pieņemts patenta pieteikums par šo digitālā zenītteleskopa optisko sistēmu „Katadioptriska optiska sistēma ar difrakcijas izšķiršanas spēju pa visu redzeslauku”.

GENERAL REVIEW OF THE THESIS

Subject Topicality and Formulation of the Problem

Determination of high accuracy coordinates is required in a number of today's industries, thus GNSS (Global Navigation Satellite System) is of crucial importance. A number of high precision global and regional GNSS networks have been established and are being continuously developed around the world. The GNSS networks of LATPOS and EUPOS[®]-Riga are operating in Latvia. But since GNSS only provides the value of height h above the mathematically defined Earth's ellipsoid and traditionally the average value above sea level is used as height, it is necessary to obtain high accuracy values for normal heights H . In order to obtain such values, one must transform the ellipsoidal height h into the normal height above sea level as follows $H = h - N$, i.e. above geoid (N - geoid height above the ellipsoid at a given point). Such transformation calls for a high precision geoid model in order to enable an acquisition of highly accurate values. Geoid represents the equipotential surface of the gravity field. Such surface may be represented as a surface of the ocean at still which continues its span under continents thus identifying geoid - the balanced mathematical figure of Earth's gravity force.

The current precision of LV'98 - the gravimetric geoid model of Latvia reaches 6 - 8 cm [56]. The model was created in 1998 by Dr.sc.ing. J. Kaminskis with the use of gravimetric measurement data available on USSR era maps and the method used in the software developed in Denmark. It was a crucial achievement for geodesy industry of Latvia since it is the first and up until now - the only official geoid model of Latvia. However, the increase of usage volumes of GNSS method in the national economy of Latvia sets new tasks and new requirements for accuracy. 15 years have passed since the creation of LV'98 and the precision of Latvian geoid model is no longer compatible with that of GNSS measurements and volumes of use. There is a necessity for a more accurate geoid model to enable a prompt determination of normal height with the use of GNSS coordinate determination methods. Such necessity is a result of high precision requirements in civil engineering, geodesy, cadastre and other industries. Currently, the Latvian height system is in transition from BAS-77 (Baltic Height System) to EVRS2007 system [117]. The necessity of an accurate geoid model is highly urgent in order to strive towards the compliance with requirements by European Vertical Reference System (EVRS).

The results of recent research on Earth's gravity field conducted by National Aeronautics and Space Administration (NASA) and European Space Agency (ESA) have yielded new models of Earth's global gravity field (GGM). Both the data from gravity satellite missions (GRACE, GOCE etc.) and data from the gravimetric measurements performed on Earth's surface have been used for computation of national geoid models. However, in some countries vertical deflections on the basis of astrogeodetic methods are being used recently. Astrogeodetic data allows for both to validate the developed geoid model and to improve it obtaining a higher degree of its precision. In Latvia a significant contribution to the performance of gravimetric measurements have been provided by Latvian Geospatial Information Agency (LGIA). In spite of the fact, that a significant amount of gravimetric measurements are obtained, much more further measurements are required and the improved geoid model in Latvian geodesy is needed.

The astrogeodetic method is known since mid-20th century, however with little recognition, since the acquisition and processing of high quality data was time and labour consuming process. During the recent decades and thanks to the emergence of charge-coupled device (CDD) imaging technologies, this method has become increasingly popular. The research conducted in collaboration between Switzerland and Germany has yielded that astrogeodetic methods provide a faster result with a smaller number of measurements than in the case of gravimetric methods using new imaging technologies and recently compiled massive aerospace star catalogues [32] [36] [37] [38]. In order to apply and expand the astrogeodetic method in Latvia, the precision improvement of Latvian geoid model requires conducting vertical deflection measurements in Latvia.

Objective and Tasks of the Thesis

The objective is to obtain scientific research results on the possibilities to develop a higher precision geoid model of Latvia using various methods and data sets - global Earth's gravity field models, gravimetric, GNSS/levelling and astrogeodetic.

The following tasks were set forth in order to achieve the objective of the thesis:

- 1) Study and analysis on the possibilities to apply the most recent global gravity field models for the improvement of the national geoid model of Latvia.

2) Study on the use of gravimetric method by the Royal Institute of Technology (KTH) under the conditions of Latvia and analysis of results.

3) Development of a new Latvian geoid model with the use of Digital Finite Element Height Reference Surface (DFHRS) method and analysis of results.

4) Analysis of astrogeodetic method and opportunities of its application. Development of a digital zenith telescope optics and telescope prototype. Analysis of experimental vertical deflection measurements.

The Scientific Novelty of the Work

New Latvian geoid model with 1.6 cm mean square error, which is significantly higher accuracy than of currently used LV'98 geoid model. It proved that DFHRS method gives the best results. Expanding GNSS measurements from the entire 1st order levelling network appears opportunity to improve this Latvian geoid model precision.

Gravimetric geoid model obtained with KTH method shows less precise results for the whole Latvian territory using digitized USSR gravity anomaly data and for the Riga region using newest Latvian Geospatial Information Agency gravimetric measurement data. The gravimetric measurement data density in Latvia is not yet sufficient.

For the first time the digital zenith telescope for vertical deflection measurements will be used in order to control and to improve the precision of Latvian geoid model using astrogeodetic method. This data will be used as soon as the minimal amount of measured data with digital zenith telescope will be obtained. These new methods have not been used in previous Latvian geoid model computations.

Practical Application of the Thesis

New Latvian geoid model with 1.6 cm mean square error was obtained using DFHRS method.

Global Earth's gravity field model usage options were examined, vertical deflection calculation for territory of Latvia was made using global Earth's gravity field model data.

Gravimetric geoid model for the whole territory of Latvia was obtained using the KTH method, the computations were performed experimenting with the input data and parameters.

Gravimetric geoid model for Riga region based on the newest gravimetric measurement and global Earth's gravity field model data was obtained using the KTH method.

Digital zenith telescope prototype and data processing algorithm was developed.

Original optical scheme for zenith telescope prototype with a diffraction resolution capability all over field of view was developed.

The Methodology of the Research

In the research of the thesis two different methods were used for the computation of the geoid model with the application of two different sets of input data respectively. DFHRS method was used for geoid model calculations across the whole territory of Latvia. The obtained result was subject to quality control with the use of 1st and 2nd class levelling data points that were not used in computations before. KTH method was used for experimental gravimetric geoid model calculations for Latvia and Riga region. Experiments were conducted with software input parameters and input data for acquisition of most precise result. The results yielded by both methods were transformed into the Latvian Height System and compared to the existing Latvian geoid model LV'98 and other GGM's.

Monthly gravity field change analysis was conducted with the use of data from POET interactive browser [119], while the results were interpolated and visualised within the environment of *Matlab* software. Vertical deflections from GGM were calculated with the use of *EGMlab* software in *Matlab* environment [61] and supplemented with STDEV vertical deviation calculations. *Matlab* environment software was used for calculation of Molodensky and Helmert vertical deflection corrections.

Experimental vertical deflection observations were made with the use of the digital zenith telescope prototype build by Institute of Geodesy and Geoinformatics in University of Latvia (LU GGI). The telescope features high precision mechanical, GNSS, electronic and optical components. Control of the zenith telescope and data processing was performed using software developed by LU GGI - based on the theories of applied astronomy and geodesy [2]. Star

image identification was done with the use of *Tycho-2* [16] and NOMAD [107] reference star catalogue subsets. Assembling parts of the zenith telescope were constructed and their load calculations were done using *Solid Edge* software.

Theoretical and Methodological Bases of the Research

The performed research is based on the following engineering science branches:

- Geodesy and geoinformatics;
- Geodynamics;
- Geodetic astronomy;
- Optics;
- Mechanics.

Scope of the Study

Input data on different territories were used for calculation of different versions of geoid model - gravimetric data for the region of Riga and whole territory of Latvia, and GNSS/levelling data for the entire territory of Latvia. The geoid model of Latvia obtained with the use of DFHRS method substantially exceeds the precision of that offered by the LV'98 model. The assessment of precision shows that the use of model obtained via DFHRS method may provide a significant improvement of measurements across the entire territory of Latvia.

The parameters of zenith telescope are characterised by the attainable precision of experimental vertical deflection measurements in urban environment being ≤ 0.2 arc seconds by recording the correct time of no less than precision of 1 mks and determining coordinates with a stand-alone GNSS receiver with a precision of 0.15 - 0.35 m. Levelling is performed automatically. The equipment controls background noise thus allowing observations at a certain level of background noise. The recording of image takes ≥ 0.2 seconds.

Results Presented for the Defense

- 1) New high accuracy Latvian geoid model.
- 2) Digital zenith telescope prototype and data processing algorithm for progressive astrogeodetic method use.
- 3) Original optical system for digital zenith telescope prototype.

Structure and Volume of the Doctoral Thesis

The thesis consists of abstract, introduction, six main chapters divided into sub-chapters, conclusions and bibliography.

The first chapter reviews global Earth's gravity field models, the broad range of their application opportunities and a few examples. The second chapter describes the KTH geoid model computation method and an experimental gravimetric geoid model computation with the use of KTH method for the territory of Latvia and for the Riga region. The third chapter provides a description of the DFHRS method as well as the computation and the obtained results of Latvian geoid model with the use of this method. The fourth chapter provides a theoretical elaboration on the basic principles of determining the astrogeodetic vertical deflections as well as on the astronomical levelling. The fifth chapter includes a literature review on the development of digital zenith cameras in Europe during the last decades. The basic technical, optical, electronic and software principles are described. The sixth chapter presents a montage model of the developed digital zenith telescope and analysis of the first observations obtained by the newly constructed digital zenith telescope in Latvia.

Thesis contains 127 pages, 92 figures, 7 tables and reference list of 121 sources. Thesis language is Latvian.

The Approbation of the Results

a) Reports in international and local scientific conferences:

- 1) Janpaule I. Application of KTH method for determination of Latvian geoid model // International Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies”. Riga, Latvia, 8 November, 2013.
- 2) Balodis J., Haritonova D., Janpaule I., Normand M., Silabriedis G., Zarinsjh A., Rubans A., Kalinka M., Jumare I., Lasmane I. On the geodynamics in Latvia (poster) // ESA Living Planet Symposium. Edinburgh, Great Britain, 9–13 September, 2013.
- 3) Janpaule I., Balodis J. Steps Towards improvement of Latvian geoid model // European Geosciences Union 2013, Vienna, Austria, 7-12 April, 2013.
- 4) Haritonova D., Balodis J., Janpaule I., Normand M. GNSS station displacement analysis (poster) // European Geosciences Union 2013, Vienna, Austria, 7-12 April, 2013.

- 5) Janpaule I. Latvijas (kvazi)ģeoīda aprēķini, kvalitātes novērtējums un salīdzinājums ar globālajiem gravitācijas lauka modeļiem // 71st Scientific Confenece of University of Latvia, Astronomy and Geodesy section, 2nd session, Riga, Latvia, 14th February, 2013.
- 6) Janpaule I., Balodis J., Zarinsh. Improvement of Latvian Geoid Model using GOCE Data and Vertical Deflection Measurements (poster)// GOCE Solid Earth workshop, Enschede, Netherlands, 16-17 October, 2012.
- 7) Janpaule I. On the vertical deflection measurements for improvement of Latvian geoid model // Riga Technical University 53rd International Scientific Conference. Riga, Latvia, 11-12 October, 2012.
- 8) Janpaule I., Morozova K. Combination of KTH geoid solution with GPS-levelling data // Riga Technical University 53rd International Scientific Conference. Riga, Latvia, 11-12 October, 2012.
- 9) Abele M., Balodis J., Janpaule I., Normand M., Rubans A., Silabriedis G., Ubelis A., Zarinsh A. Research Activities in Geodesy at the University of Latvia // 18th Ka and Broadband Communication Navigation and Earth Observation Conference. Ottawa, Canada, September 24-27, 2012.
- 10) Balodis J., Balodis K., Haritonova D., Janpaule I., Normand M., Silabriedis G., Plotnikov S., Rubans A., Zarinsh A. On the height component for GNSS positioning // United Nations/Latvia Workshop on the Applications of Global Navigation Satellite Systems. Riga, Latvia, 14-18 May, 2012.
- 11) Balodis J., Janpaule I., Haritonova D., Normand M., Silabriedis G., Zarinsh A., Zvirgzds J. GNSS network time series analysis // European Geosciences Union 2012, Vienna, Austria, 22-27 April, 2012.
- 12) Balodis J., Janpaule I., Rubans A., Zarinsh A., Abele M., Ubelis A., Cekule M. Eventual Participation in GMES of Institute of Geodesy and Geoinformatics (poster) // European Geosciences Union 2012, Vienna, Austria, 22-27 April, 2012.
- 13) Janpaule I. Latvijas ģeoīda modelēšana, izmantojot KTH-Geolab programmatūru // 70th Scientific Confenece of University of Latvia, Astronomy and Geodesy section, 2nd session, Riga, Latvia, 9th February, 2012.
- 14) Balodis J., Haritinoava D., Janpaule I., Morozova K., Normand M., Silabriedis, G., Zvirgzds J. GNSS Network Station's Time Series Analysis // International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-based and Ground-based Augmentation Systems and Applications. Berlin, Germany, 10-11 October, 2011.
- 15) Janpaule I. LATPOS un EUPOS-Rīga iknedēļas SINEX risinājumi // 69th Scientific Confenece of University of Latvia, Astronomy and Geodesy section, 2nd session, Riga, Latvia, 11th February, 2011.

- 16) Ābele M., Balodis J., Janpaule I., Rutkovska E. Zenītteleskopa optiskās sistēmas parametri pie dažādām apkārtējās vides temperatūrām // 69th Scientific Confenece of University of Latvia, Astronomy and Geodesy section, 2nd session, Riga, Latvia, 11th February, 2011.
- 17) Balodis J., Janpaule I., Normand M., Silabriedis G., Rubans A., Zariņsh A. Measuring of the environmental changes // Euro-eco, Das Internationale Symposium „Ökologische, Technologische und Rechtliche Aspekte der Lebensversorgung”. Hannover, Germany, 2-3 Dezember, 2010.
- 18) Balodis J., Balodis, K., Janpaule, I., Kaminskis J., Normand M., Mitrofanovs I., Plotnikovs S., Rubans A., Silabriedis G., Zvirgzds J. On road of “EUPOS[®] Contribution to GOCE Mission” // International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-based and Ground-based Augmentation Systems and Applications. Brussels, Belgium, 28-29 November, 2010.
- 19) Kaminskis J., Balodis J., Janpaule I., Normand M., Rubans A., Silabriedis G., Zvirgzds J. EUPOS Contribution to GOCE Mission // 18th Conference of the International EUPOS[®] Steering Committee. Warsaw, Poland, October 26-27, 2010.
- 20) Kaminskis J., Balodis J., Janpaule I., Normand M., Rubans A., Silabriedis G., Zvirgzds J. Evaluation of height network in Latvia // NKG General Assembly. Hønefoss, Norway, September 27-30, 2010.
- 21) Balodis J., Janpaule I., Normand M., Plotnikovs S., Rubans A., Silabriedis G., Zvirgzds J. RTK Application for Levelling Network Deformation Control // 15th General Assembly of WEGENER. Istanbul, Turkey, 14-17 September, 2010.
- 22) Balodis, J., Caunite, M., Janpaule, I., Rubans A., Silabriedis, G., Zariņš, A. EUPOS and SLR Contribution to GOCE Mission // ESA Living Planet Symposium 2010. Bergen, Norway, 29 June – 2 July, 2010.
- 23) Caunīte M., Janpaule I. Iknedēļas SINEX datnes EUPOS Kombinēšanas Centram // 51st Riga Technical University scientific and technical conference, Geomatics section, Riga, Latvia, 21st April, 2010.
- 24) Janpaule I. Bernes programmatūras ekspluatācija *Baltic Grid* virtuālās mašīnas vidē // 68th Scientific Confenece of University of Latvia, Astronomy and Geodesy section, 2nd session, Riga, Latvia, 19th February, 2010.
- 25) Janpaule, I., Caunite, M., Balodis, J., Silabriedis, G. EUPOS[®] Network Solution // International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications. Berlin, Germany, 30 November – 2nd December, 2009.

- 26) Balodis, J., Silabriedis, G., Caunite M., Janpaule, I., Balodis, K., Rubans, A., Aleksejenko, I., Otto, R., Ratkus, B., Reiniks, M., Mitrofanovs, I., Plotnikovs, S., Zvirgzds, J. *EUPOS®-RIGA Network Elevation Analyses // International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications*, Berlin, Germany, 30 November – 2nd December, 2009.

b) The patent application:

The originality of work is approved by application of the patent of Republic of Latvia Nr. P-13-45: Ābele M., Balodis J., Janpaule I., „Catadioptric optical system with diffraction resolution all over field of view”.

List of the Scientific Publications on the Topic of the Thesis

a) In scientific journals:

- 1) Janpaule I., Jager R., Younis G., Kaminskis J., Zariņš A. DFHRS-based computation of quasi-geoid of Latvia // *Geodesy and Cartography*. -2013. -Volume 39. -Issue 1, pp. 11-17 (*indexed in SCOPUS*).
- 2) Abele M., Balodis J., Janpaule I., Lasmane I., Rubans A., Zariņš A. Digital Zenith Camera for Vertical Deflection Determination // *Geodesy and Cartography*. -2012. -Volume 38. -Issue 4, pp. 123-129 (*indexed in SCOPUS*).

b) In RTU scientific journal:

- 3) Janpaule I. Bernes programatūras lietošana *BALTIC GRID* virtuālās mašīnas vidē // *Scientific Journal of Riga Technical University. Geomatics*. -Riga: RTU, 2010. -Volume 11. -Issue 7, pp. 27-30.

c) In full paper conference proceedings:

- 4) Janpaule I. Application of KTH method for determination of Latvian geoid model // *Proceedings of International Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies”*. Riga, Latvia, 8 November, 2013 (*accepted for publication*).
- 5) Balodis J., Haritonova D., Janpaule I., Normand M., Silabriedis G., Zariņš A., Rubans A., Kalinka M., Jumare I., Lasmane I. On the geodynamics in Latvia // *Proceedings of ESA Living Planet Symposium*. Edinburgh, Great Britain, 9-13 September, 2013. ISBN 978-92-9221-286-5 (*Published on CD*).
- 6) Haritonova D., Balodis J., Janpaule I., Normand M. Displacements at the GNSS Stations // *Civil Engineering '13, 4th International Scientific Conference Proceedings*, Volume 4. Jelgava, Latvia, 16-17 May, 2013. ISSN 2255-7776. pp 305-309.

- 7) Abele M., Balodis J., Janpaule I., Normand M., Rubans A., Silabriedis G., Ubelis A., Zarinsjh A. Research Activities in Geodesy at the University of Latvia // Proceedings of the 18th Ka and Broadband Communication Navigation and Earth Observation Conference. Ottawa, Canada, September 24-27, 2012. pp. 91-96.
- 8) Balodis J., Haritonova D., Janpaule I., Morozova K., Normand M., Silabriedis G., Zarinsjh A., Zvirgzds J. GNSS Network Station's Time Series Analyses // Proceedings of the International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications 2011. Berlin, Germany, 10-11 October, 2011 (*accepted for publication*).
- 9) Kaminskis J., Balodis J., Janpaule I., Normand M., Rubans A., Silabriedis G., Zvirgzds J. Evaluation of height network in Latvia // Proceedings of 16th General Assembly of the Nordic Geodetic Commission. Hønefoss, Norway, September 27-30, 2010. pp. 169-172.
- 10) Balodis J., Balodis K., Janpaule I., Kaminskis J., Normand M., Mitrofanovs I., Plotnikovs S., Rubans A., Silabriedis G., Zvirgzds J. On Road of "EUPOS[®] Contribution to GOCE Mission" // proceedings of the International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications. Brussels, Belgium, 29 - 30 November 2010. pp. 47-50.
- 11) Balodis J., Caunite M., Janpaule I., Kenyeres A., Rubans A., Silabriedis G., Rosenthal G., Zariņš A., Zvirgzds J., Abele M. EUPOS and SLR Contribution to GOCE Mission // Proceedings of ESA Living Planet Symposium. Bergen, Norway, 29 June – 2 July 2010. ISBN 978-92-9221-250-6 (*Published on CD*).
- 12) Janpaule, I., Caunite, M., Balodis, J., Silabriedis, G. EUPOS[®] Network Solution // Proceedings of the International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications. Berlin, Germany, 30 November – 2nd December, 2009. pp. 61-67.
- 13) Balodis, J., Silabriedis, G., Caunite M., Janpaule, I., Balodis, K., Rubans, A., Aleksejenko, I., Otto, R., Ratkus, B., Reiniks, M., Mitrofanovs, I., Plotnikovs, S., Zvirgzds, J. EUPOS[®]-RIGA Network Elevation Analyses // Proceedings of the International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications, Berlin, Germany, 30 November – 2nd December, 2009. pp. 68-72.
- 14) Abele M., Balodis J., Caunite M., Janpaule I., Rubans A., Silabriedis G., Zarinsjh A. Engineering process of SLR for LEO orbiters // Proceedings of the 16th International Laser Ranging Workshop. Poznan, Poland, 13-17 October, 2008. p. 641-643.

CONTENT OF THE DOCTORAL THESIS

Introductory part of the doctoral thesis contains a formulation of the topicality of the subject, the objective and the main tasks to achieve, as well as scientific novelty, practical application of the study and results presented for the defense.

Global Earth's Gravity Field Models

Recent achievements of satellite missions have delivered broader and more specific knowledge on the gravity field of Earth, the global gravity field models of Earth have become highly important in geosciences. This knowledge is used in the computation of national and regional geoid models which are further complemented with data obtained via local measurements.

The global Earth's gravity field models - Aiub-Grace01s [46] and Aiub-Grace02s [45] - are used for the calculation of vertical deflection components in the territory of Latvia; as well standard deviations were calculated for these components. Figure 1 illustrates the North-South (NS) component of vertical deflections and the standard deviation of it in the territory of Latvia from the global gravity field model of Aiub-Grace02 with a truncation border of $n=90$. Both vertical deflection components change in the given region from around -2 to +5 arc seconds and maps of both models show similar results. The standard deviations of Aiub-Grace02s global gravity field model are around 10 times lower than that of Aiub-Grace01s model.

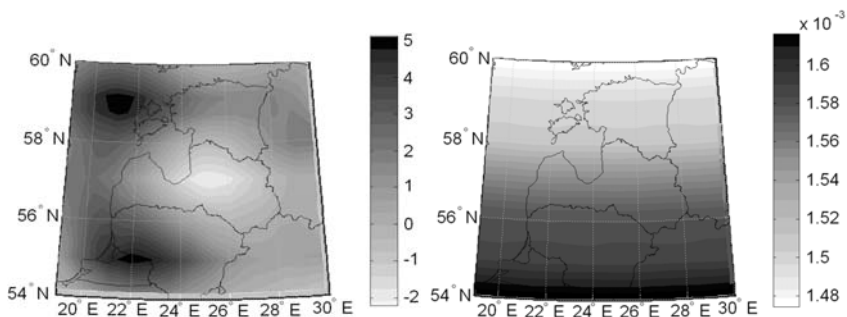


Figure 1. NS component of Aiub-Grace02s GGM vertical deflections (left) and its standard deviation (right) $n=90$ [arc sec]

The spherical harmonic coefficients reflect the global structures and irregularities of Earth's gravity field. Coefficients of higher degree correspond

to a higher spatial resolution. In reality gravity field may not be determined with unlimited spatial resolution, maximum spherical harmonic coefficient degree or the truncation border must be introduced in the calculations.

Example with an NS component of vertical deflections in the territory of Baltic states from the global gravity field model of Aiub-Grace01s with four different truncation borders (120, 90, 60 and 30) reveals that a substantial decrease in standard deviations may be acquired via reduction of truncation borders. For truncation border $n=120$ standard deviations fluctuate between 0.1382 and 0.1396 arc seconds, $n=90$ - between 0.0141 and 0.0145 arc seconds, $n=60$ - between 0.00124 and 0.00143 arc seconds and $n=30$ - 0.000095 and 0.000101 arc seconds. However upon reducing the truncation border, so reduces the resolution for the vertical deflections obtained from the global model.

In order to transform Molodensky's vertical deflections into Helmert's vertical deflections, the two following corrections are required: correction of normal plumb line deflection and ellipsoidal correction [40]. The correction of normal plumb line for the Baltic region is within the range of -0.02 to +0.04 arc seconds, while the ellipsoidal correction in this region is within the range of -0.04 to +0.03 arc seconds.

KTH Geoid Model Computation Method

The geoid model computation method by KTH was developed at the Royal Institute of Technology (KTH) in Stockholm and it is based on a modified version of Stoke's formula [60]. In the initial phase of experimental gravimetric geoid model computation in the territory of Latvia by KTH method digital free air anomaly data from the USSR era [118] and data from EGM2008 - global Earth's gravity field model [116] were used. Several geoid models were computed for the territory of Latvia changing maximum truncation border of global Earth's gravity field models (up to 360., 180. or 120. degree) and maximum spherical integration radius. Using this input data set, a higher result than that with the mean square error of 22.5 cm was not obtained.

Also data from the gravimetric measurements of Latvian Geospatial Information agency [117] for the region of Riga were used within the range of 23°00'00" to 24°54'00" Eastern longitude and from 56°34'48" to 57°24'00" Northern latitude, the overlay of which is presented in Figure 2 and EGM2008 data up to degree 360 as well as data from GO_CONS_GCF_2_DIR_R4 GGM [9] up to degree 260.

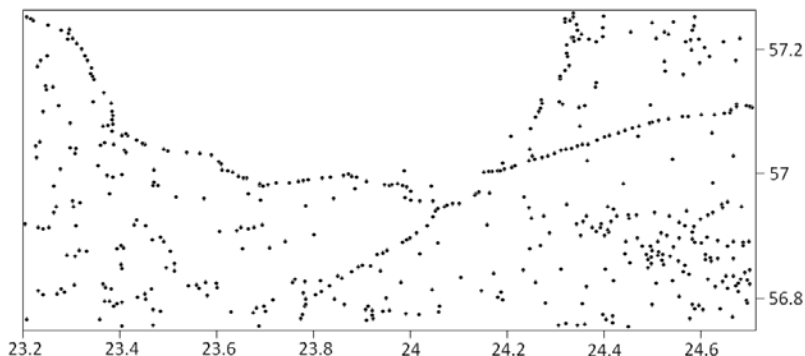


Figure 2. The location of LGIA gravimetric measurement points in the territory of Riga region

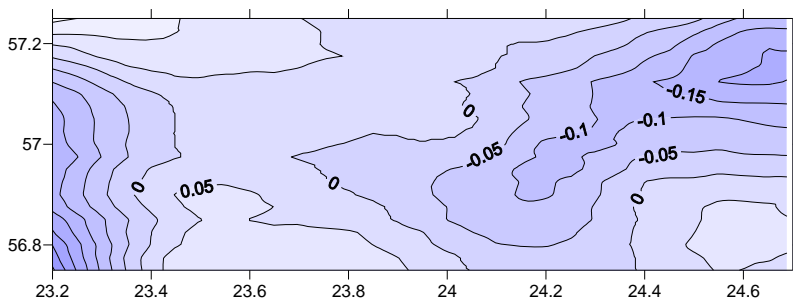


Figure 3. LV'98 and KTH GO_CONS_GCF_2_DIR_R geoid height comparison for solutions in the region of Riga [m]

The mean square error of the obtained geoid model for the region of Riga using EGM2008, according to the GNSS/levelling data is equal to 7.5 cm. With the use of this most recent data from gravimetric measurements and recently published data on GO_CONS_GCF_2_DIR_R4 - Earth's gravity field model obtained by GOCE satellite, the mean square error of the geoid model according to the data points of GNSS/levelling is 5 cm. A comparison between the aforementioned model and the geoid model LV'98 of Latvia is presented in Figure 3.

DFHRS Geoid Model Computation Method

The method of digital finite element height reference surface (DFHRS) was developed at the University of Applied Sciences in Karlsruhe, Germany. It is based on highly accurate adjustment of global and gravimetric geoid models to the local height system represented by the set of GNSS/levelling data [114]. The advantage of the method lies in the fact that upon altering computation parameters, for example, the size of the meshes and patches, it is possible to improve results even upon scarce or low quality observation data.

European gravimetric geoid model of EGG97 was used as input data in the computation of Latvian geoid height reference surface. 102 data points of GNSS/levelling were used in order to define the height system. Most of such points were located within the territory of Latvia, with 2 points being located in Estonia and 17 - in Lithuania close to the border of Latvia. The planned size of mesh elements was 5 x 5 km, while the total number of mesh elements for entire computation area was 4601. Patch sizes differed depending on the placement and density of reference points (from 80 x 40 km to 150 x 100 km). Each patch must include at least 4 reference points in order to provide a definition of the system. In Figure 4 geoid undulations and vertical deflection values are determined for 25 points in each mesh element.

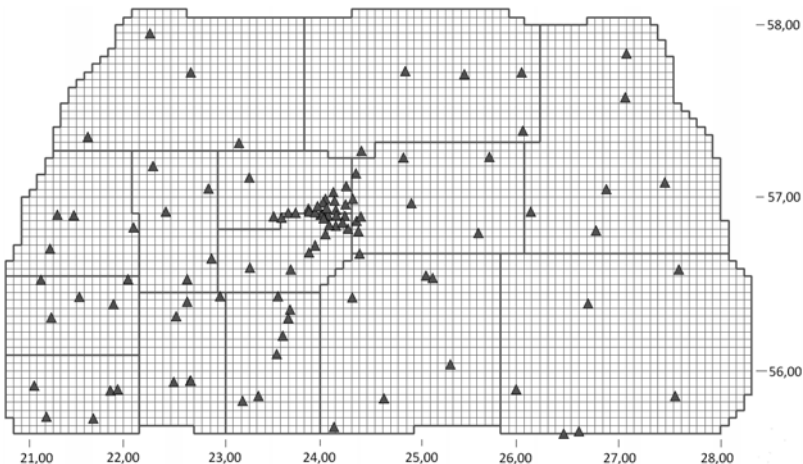


Figure 4. Computation model design for the DFHRS solution of Latvia, the thin lines represent the elements of the grid, while the thick lines - borders of areas and triangles - reference points

The results of the computation reveal that the height of geoid in the territory of Latvia is in the range of 19.20 m in North-West up to 24.50 m in South-West (see Figure 5). RMSE value of the obtained model is 1.6 cm based on the 102 GNSS/levelling points used in the computation.

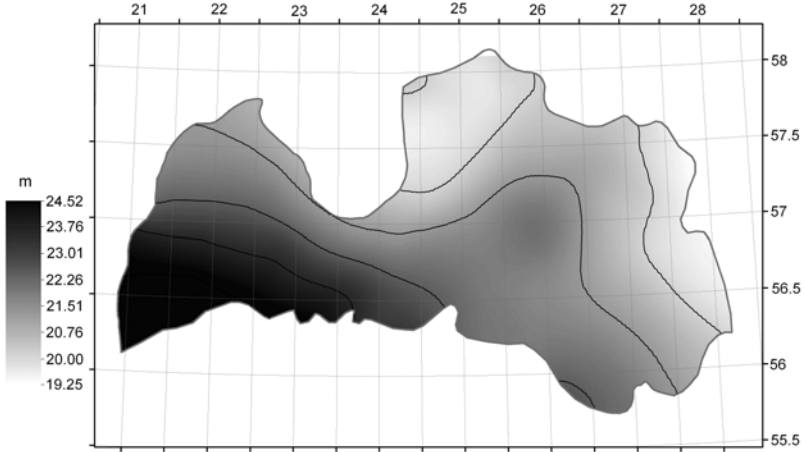


Figure 5. DFHRS geoid height reference surface for the territory of Latvia

Five global Earth's gravity field models - EGM2008 [78], EGG97 [10], Eigen05c [22], Eigen06c [23], GO_CONS_GFC_2_DIR_R3 [76] [113] were transformed to adjust them to the height system of Latvia and compared with the currently used gravimetric geoid model LV'98 of Latvia and the developed DFHRS model as well as the data points of GNSS/levelling. EGM2008 and EGG97 are most compatible with both LV'98 as well as DFHBF solution, the standard deviations of those being around 5 cm. GO_CONS GFC_2_DIR_R3 model was least compatible, this model unlike others includes only gravity measurement data from satellites.

Astrogeodetic Methods

There are two components for the vertical deflection: North-South component ξ and East-West component η [43]

$$\begin{aligned} \xi &= \Phi - \varphi, \\ \eta &= (\Lambda - \lambda)\cos \varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

where Φ and Λ are astronomical coordinates, φ and λ are geographic ellipsoidal coordinates.

If vertical deflections ξ and η are obtained directly from equations (1), upon comparing astronomical and geodetic coordinates for the same point, then such method is determination of astrogeodetic geoid model. Astronomical coordinates are observed directly, geodetic coordinates are obtained via use of GNSS technologies. In the thesis zenith telescope was used as a principal tool for the determination of vertical deflections.

The undulation form of geoid may be found performing astronomical levelling if vertical deflections are available across the entire length of the profile. North-South or East-West oriented profiles are often used in practice. The component of vertical deflection must be available in a sufficient number of profile stations in order to achieve a reliable interpolation between these stations. For a network of astrogeodetic stations with a mean distance between stations of 10 - 20 km, interpolation may be carried out as follows:

$$N_B = N_A - \int_A^B \varepsilon ds, \tag{2}$$

where

$$\varepsilon = \xi \cos \alpha + \eta \sin \alpha \tag{3}$$

is the component of vertical deflection for a profile AB with an azimuth of α [43]. The changes in the geoid height for the line AB may be determined as well as for other lines BC and CA in the triangle ABC in a similar manner (Figure 6).

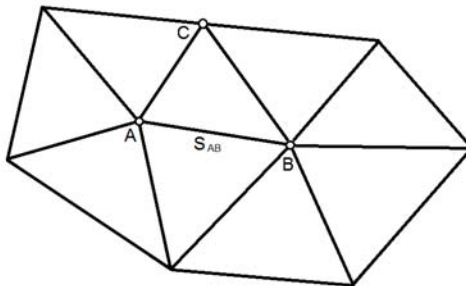


Figure 6. Triangulation network of astrogeodetic geoid

On the basis of previous research about the necessary density of vertical deflection measurements to obtain a geoid model with a precision of 1-2 cm, the approximate number of necessary vertical deflections may be determined [26]. In order to obtain a 1-2 cm precision for a geoid model of 1000 km² area, a total of 1000 gravimetric points must be provided while in terms of astrogeodetic points - a total of 30 is deemed sufficient.

Basic Principles of Digital Zenith Telescopes

A number of zenith telescope projects have been developed in Europe over the last years. Two slightly different zenith camera systems are considered to be the most popular and widely mentioned across publications, TZK2-D system developed at the Institute of Geodesy at the University of Hanover [41], while the other - DIADEM system - was developed at ETH Zurich [32]. A system for an automatic determination of vertical deflections was also developed in Poland at the AGH University of Science and Technology, Faculty of Mining Surveying and Environmental Engineering [63], in Serbia at the Civil Engineering Faculty, Department of Geodesy and Geoinformatics [75], in Turkey at the Bosphorus University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Department of Geodesy [29], as well as at the Vienna University of Technology, Institute of Geodesy and Geophysics [25]. Precision has been assumed and results have been published only for two of the aforementioned digital zenith camera systems - TZK2-D and DIADEM.

In most cases digital zenith telescopes are of similar design principle. A digital zenith telescope consists of an optical system oriented towards the zenith, CCD sensor for registration of stars, GNSS receiver for determination of ellipsoidal coordinates and precise time, and electronic tiltmeters for the determination of plumb-line. A computer is used for system management and control of the data flow as well as for an immediate processing of data (Figure 7).

CCD electro-mechanical switch is opened after the levelling and focusing of the zenith telescope in order to obtain an image of zenith stars. In the meantime, GNSS performs a time measurement. Both the signals of tiltmeters and the CCD are being recorded. After that, CCD image data and information on GNSS time are transmitted to a computer, the zenith telescope is being rotated and the data acquisition procedure is repeated. A number of images obtained at different camera positions form one observation together with the respective epochs and tiltmeter measurements.

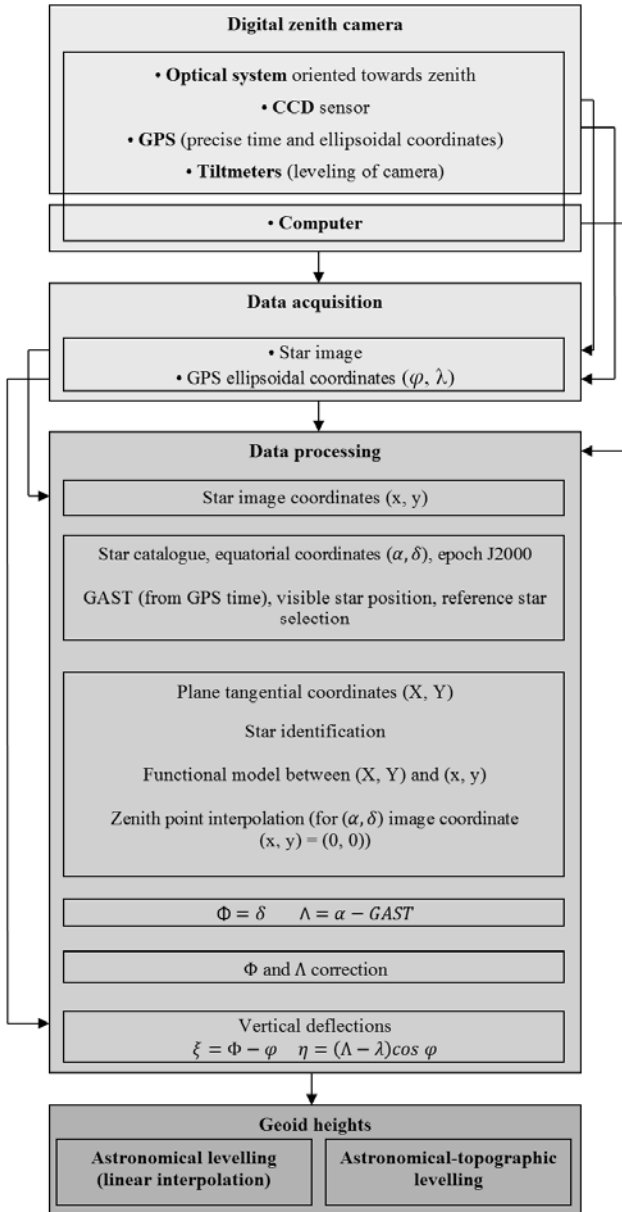


Figure 7. Simplified scheme of digital zenith telescopes

Observations are performed at multiple camera directions in order to reduce the influence of CCD and tiltmeter zero point ambiguity. It is recommended to conduct data acquisition in a back and forth mode. Such systemic sequence reduces the linear variations of sensor deviations which may arise as a result of temperature changes during observations. Finally, the ellipsoidal coordinates are determined via GNSS.

Mount Model of Digital Zenith Telescope

The development of a zenith telescope (see Figure 8) was commenced in 2011 in the Institute of Geodesy and Geoinformatics at the University of Latvia, the objective is to obtain a precision of 0.1 arc second [2]. Experimental observations were performed from November 2011 to March 2012 and objective was to assess the characteristic values of opto-mechanical assembly, compute zenith point position and determine its precision, determine the characteristic values of the observed stars, complement and improve data processing software, integrate precise image exposition time fixation equipment in the system.



Figure 8. A prototype of a digital zenith camera (left) and final construction (right)

The prototype of the zenith camera is a 20 cm catadioptric telescope with a 1390 mm focus distance and CCD imaging device with 1350x1024 square 6.45 mkm pixels able to cover a field of 0.35x0.27 degrees. Optical system of the prototype is original and a patent application has been submitted under No.P-13-45 "Catadioptric optical system with diffraction resolution all over field of view" on 8th April, 2013 at the Patent Office of the Republic of Latvia. The telescope is placed on a horizontal surface, it is supported by three precision bearing and it may be rotated around the vertical axis at any angle using stepper motor. The tiltmeter is mounted on telescope's cylinder. In the final version rotating part will have a battery power source and will communicate with control computer using a wireless (WiFi) communication device.

Images obtained with a prototype instrument at the city centre environment, shows starts up to 13^m magnitude for 0.1 second exposure. The mean number of stars per frame is 12. Timing accuracy of obtained star images is estimated to be within 10 milliseconds. A processed image of zenith area is presented in Figure 9.

The RMS value of precision tiltmeter continuous observation series fluctuates from 2-3" indoors to 0.2-1" on a stable surface in city environment, acquisition of measurements has to be performed in locations with a minimum influence of background vibrations. The requirements for instrument's base stability and rotation mechanism accuracy do not have to be very strict, it is enough, that instrument has good stability within time intervals (10–20 seconds) when frame measurements are captured.

The high sensitivity of the equipment restricts data recording conditions. It was found and taken into consideration that recorded data are affected by the movement of persons within the distance of 3-4 m from the zenith telescope as a result of deforming asphalt and cobblestone coverings, also open ground. It confirmed the necessity to replace control and data transfer cables with wireless solutions. The equipment must be also protected from the effects of wind. In cold weather the equipment was effected by the body heat irradiated by a nearby person thus causing atmospheric turbulence.

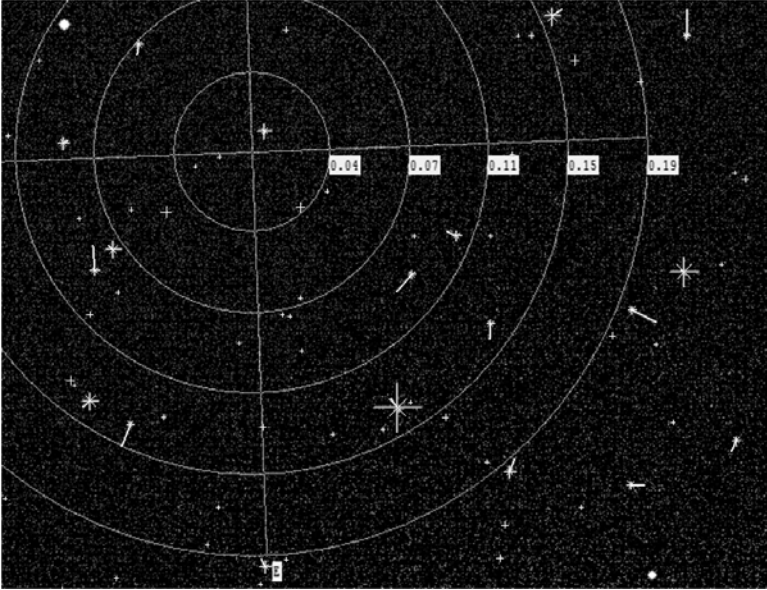


Figure 9. Processed image of zenith area. Catalogue stars up to 13^m are represented as straight crosses, image stars - as oblique crosses, while lines illustrate approximation residuals

CONCLUSIONS

The thesis presents research results on the opportunities to obtain a high precision geoid model of Latvia with the use of various internationally recognised methods and software as well as by assessing the existing data sets both within the whole territory of Latvia and in the experimental area - Riga region.

With the use of KTH for gravimetric geoid model computation for the whole territory of Latvia, initially digitised data of free air anomalies from USSR era and data of global Earth's gravity field model EGM2008 was used, a higher result than that with the mean square error of 22.5 cm was not obtained. The application of most recent gravimetric measurement data from the Latvian Geospatial Information agency for the region of Riga and the data of EGM2008 data yielded a geoid model for the region of Riga with a higher precision, the mean square error of which according to the GNSS/levelling point data was 7.5cm. The use of most recent gravimetric measurement data and the Earth's gravity field model data from GOCE satellite GO_CONS_GCF_2_DIR_R4 revealed that the mean square error according to GNSS/levelling point data was 5 cm. In the region of Riga the compatibility of GOCE model is better than of EGM2008 model. It must be concluded that the quality of historical gravimetric data restrict one from computing a high quality geoid model but the density of actual gravimetric measurements accumulated by LGIA for Latvia is not yet sufficient.

The application of DFHRS method for Latvian geoid model computation on the basis of GNSS/levelling data sets and data from gravimetric geoid model EGG97 presents the most accurate result. As a result, the geoid model obtained for the territory of Latvia is with a mean square error of 1.6 cm (according GNSS/levelling point data). With the use of data sets available in Latvia, DFHRS method yields the best results. Expanding the GNSS measurements of 1st order levelling network points, opportunities arise to further improve the precision of Latvian geoid model.

Comparing five global Earth's gravity field models - EGM2008, EGG97, Eigen05c, Eigen06c, GO_CONS_GFC_2_DIR_R3 - which were transformed in order to adjust the data to the existing height system of Latvia with the currently used gravimetric geoid model of Latvia - LV'98 and GNSS/levelling point data, it may be concluded that the best compatibility is observed for EGM2008 and EGG97 models, the least compatibility was observed for Eigen05c and GO_CONS_GFC_2_DIR_R3, these models are based on satellite measurement data and the respective resolution is no less than 100km².

Vertical deflections from global Earth's gravity field models (Molodensky's vertical deflections) in the Baltic region fluctuate from -2 to +5 arc seconds. Corrections for the recalculation of Molodensky's vertical deflections to astrogeodetic vertical deflections on ellipsoid are normal plumb line correction, which fluctuates from -0.02 to +0.04 arc seconds and ellipsoidal correction with fluctuates from -0.04 to +0.03 arc seconds in the Baltic region.

Astrogeodetic methods allow determining vertical deflections that can be integrated in the determination of geoid model. In order to create a geoid model of Latvia with a precision of 1-2 cm, a total of around 2000 astrogeodetic point measurements are required, however, for the determination of geoid model with such precision a total of ~64 500 gravimetric measurements are required.

A development of a digital zenith telescope prototype has been commenced in Latvia and the first test measurements have been carried out. Images obtained with a prototype instrument at an urban environment, shows stars until 13^m magnitude at an exposition of 0.1 second. The mean number of stars per frame is 12. Timing accuracy of obtained star images is within 10 milliseconds. The RMS value of precision tiltmeter continuous observation series fluctuates from 2-3" indoors to 0.2-1" on a stable surface in city environment, measurements have to be performed in locations with a minimum influence of vibrations. The requirements for instrument's base stability and rotation mechanism accuracy do not have to be very strict, it is enough, that instrument has good stability within 10–20 seconds when frame measurements are captured. It is concluded that expected precision for the vertical deflections obtained with the digital zenith telescope's final construction will be better than 0.1 arc second. For the first time, vertical deflection data obtained with a digital zenith telescope will be used for the improvement of geoid model of Latvia. These data will be used as soon as the minimum amount of digital zenith telescope measurement data will be obtained. This method has not been previously used in computation of geoid model of Latvia.

An optical system for a digital zenith telescope was computed; an application for a patent has been submitted and accepted by the Patent office of the Republic of Latvia - "Catadioptric optical system with diffraction resolution all over field of view".

PROMOCIJAS DARBA LITERATŪRAS ATSAUCES / LIST OF REFERENCES OF THE THESIS

1. Abdalla A., Tenzer R. The evaluation of the New Zealand's geoid model using the KTH method// *Geodesy and Cartography*. – 2010. - Volume 37, Issue 1. – p. 5-14.
2. Abele M., Balodis J., Janpaule I., Lasmane I., Rubans A., Zariņš A. Digital Zenith Camera for Vertical Deflection Determination// *Geodesy and Cartography*. – 2012. - Volume 38, Issue 4. – p. 123-129.
3. Agren J. Regional Geoid Determination Methods for the Era of Satellite Gravimetry Numerical Investigations Using Synthetic Earth Gravity Models// *Doctoral Dissertation in Geodesy*. Stockholm: Royal Institute of Technology (KTH), Department of Infrastructure, 2004. - 246 p.
4. Aleksejenko I., Sakne J., Kalinka M., Reiniks M., Kalantaite A., Krikstaponis B., Parseliunas E.K., Petroskevicius P., Viskontas P. The united geodetic vertical network of Latvia and Lithuania// *Geodesy and Cartography*. – 2012. - Volume 38, Issue 1. – p. 9-19.
5. Balodis J., Balodis K., Janpaule I., Kaminskis J., Normand M., Mitrofanovs I., Plotnikovs S., Rubans A., Silabriedis G., Zvirgzds J. On road of “EUPOS[®] Contribution to GOCE Mission“// *Proceedings of International Symposium on Global Navigation Satellite Systems, Space-Based and Ground-Based Augmentation Systems and Applications*. - Berlin: Senate Department for Urban Development, 2010. -p. 47-50.
6. Birardi G. (1976). The establishment of a net of vertical deflection points in Italy by means of a photoastronomic procedure. *Bolletino di Geodesia e Scienze Affini* 2. Firenze: Istituto Geografico Militare, 1975.
7. Bruinsma S.L., Lemoine J.M., Biancale R., Vales N. CNES/GRGS 10-day gravity field models (release 2) and their evaluation// *Advances in Space Research*. – 2010. - Volume 45, Issue 4. – p. 587-601.
8. Bruinsma S.L., Marty J.C., Balmino G., Biancale R., Foerste C., Abrikosov O. and Neumayer H, 2010, GOCE Gravity Field Recovery by Means of the Direct Numerical Method// *ESA Living Planet Symposium*. 27th June - 2nd July, 2010, Bergen, Norway.
9. Dahle C., Flechtner F., Gruber C., Koenig D., Koenig R., Michalak G., Neumayer K.-H. GFZ GRACE Level-2 Processing Standards Document for Level-2 Product Release 0005// *Scientific Technical Report – Data*. – 2012. - Potsdam. – 20 p.
10. Denker H., Paršeliūnas E. Evaluation of the European gravimetric geoid/quasigeoid EGG97 over the Lithuanian territory// *Geodezija ir Kartografija*. – 1999. - Volume 25, Issue 4. – p. 167-173.
11. Disney M., Wallace P. STARLINK// *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*. – 1982. - Volume 23. – p. 485.
12. Ellmann A. Considerations on the further improvements of regional geoid modeling over the Baltic countries// *Geodezija ir Kartografija*. – 2012. - Volume 36, Issue 1. – p. 5-15.

13. Ellmann A. The geoid for the Baltic countries determined by the least squares modification of Stoke's formula// Doctoral Dissertation in Geodesy. Stockholm: Royal Institute of Technology (KTH), Department of Infrastructure, 2004. - 96 p.
14. Ellmann A., Jürgenson H. Evaluation of a GRACE-based combined geopotential model over the Baltic countries// Geodezija ir Kartografija. – 2008. - Volume 34, Issue 2. – p. 35-44.
15. Eshaga M. Least-squares modification of stokes' formula with EGM08// Geodezija ir Kartografija. – 2009. - Volume 35, Issue 4. – p. 111-117.
16. European Space Agency (ESA). The Hipparcos and Tycho catalogues. - European Space Agency, ESA SP-1200, 1997.
17. Farrell W.E. Deformation of the Earth by surface loads// Reviews of Geophysics. – 1972. - Volume 10, Issue 3. – p. 761–797.
18. Featherstone W.E., Rüeger J.M. The Importance of Using Deviations of the Vertical for the Reduction of Survey Data to a Geocentric Datum// Australian Surveyor. – 2000. - Volume 45, Issue 2. – p. 46-61.
19. Featherstone, W.E. Augmentation of AUSGeoid98 with Grace satellite gravity data// Journal of Spatial Science. – 2007. - Volume 52, Issue 2. – p. 75-86.
20. Featherstone, W.E.; Lichti, D.D. Fitting gravimetric geoid models to vertical deflections// Journal of Geodesy. – 2009. - Volume 83, Issue 6. – p. 583-589.
21. Fjodorovs J. Tehniskā atskaite par II klases nivelēšanu Rīgas objektā. PSRS Ministru padomes Galvenās ģeodēzijas un kartogrāfijas pārvaldes uzņēmums Nr.10. Šifrs 10-03-0023. 1975.-1977.g. -130 lpp.
22. Foerste Ch., Flechtner F., Schmidt R., Stubenvoll R., Rothacher M., Kusche J., Neumayer H., Biancale R., Lemoine J.-M., Barthelmes F., Bruinsma S., Koenig R., Meyer Ul. EIGEN-GL05C - A new global combined high-resolution GRACE-based gravity field model of the GFZ-GRGS cooperation// Geophysical Research Abstracts. – 2008. - Volume 10, EGU2008-A-03426.
23. Förste C., Bruinsma S., Shako R., Marty J-C., Flechtner F., Abrikosov O., Dahle C., Lemoine J-M., Neumayer H., Biancale R., Barthelmes F., König R., Balmino G. EIGEN-6 - A new combined global gravity field model including GOCE data from the collaboration of GFZ-Potsdam and GRGS-Toulouse// Geophysical Research Abstracts. – 2011. - Volume 11, EGU2011-3242-2.
24. Freedon W., Schreiner M. Local multiscale modelling of geoid undulations from deflections of the vertical// Journal of Geodesy. – 2006. - Volume 79, Issue 10-11. – p. 641-651.
25. Gerstbach G. A Small CCD Zenith Camera (ZC-G1) – Developed for Rapid Geoid Monitoring in Difficult Projects// Proceedings of XIII National Conference of Yugoslavian Astronomy, October 17-20, 2002, University of Belgrade. – p. 221-228.
26. Gerstbach G. Geoid Monitoring by Zenith Camera and Geology, Geoscientific Cooperation Projects of Austria, Slovakia and Hungary// Conference Proceedings „The role of space methods for present day geodesy”, 2003, Technical University Bratislava. – p. 43-51.
27. Ghanema E., Jiancheng L., Jingnan L. Models for fitting gravimetric geoids and GPS results// Geo-spatial Information Science. – 2002. - Volume 5, Issue 1. – p. 28-30.

28. Grafarend E.W. The spherical horizontal and spherical vertical boundary value problem - Vertical deflections and geoidal undulations - The completed Meissl diagram// Journal of Geodesy. – 2001. - Volume 75, Issue 7-8. – p. 363-390.
29. Halicioglu K., Deniz R., Ozener H. Determination of Astro-Geodetic Vertical Deflections using Digital Zenith Camera System in Istanbul, Turkey// FIG Working Week 2012. 6-10 May 2012, Rome, Italy. / Internets. - http://www.fig.net/pub/fig2012/papers/ts04b/TS04B_halicioglu_deniz_et_al+6017.pdf.
30. Heineke U., Torge W. Determination of a fine structured astrogeodetic geoid in a tidal flat area of the North Sea// Marine Geodesy. – 1979. - Volume 2, Issue 3. – p. 201-214.
31. Heiskanen W.A., Moritz H. Physical Geodesy// - New York, London and SanFrancisco: W H Freeman and Co, 1967. - 364 p.
32. Hirt C., Bürki B. The Digital Zenith Camera – A New High-Precision and Economic Astrogeodetic Observation System for Real-Time Measurement of Vertical Deflections// Proceedings of the 3rd meeting of the international gravity and geoid commission of the international association of geodesy. August 26-30, 2002. Thessaloniki, Greece. - p.161-166.
33. Hirt C. Monitoring and analysis of anomalous refraction using a digital zenith camera system// Astronomy and Astrophysics. – 2006. - Volume 459. – p. 283–290.
34. Hirt C. Prediction of vertical deflections from high-degree spherical harmonic synthesis and residual terrain model data// Journal of Geodesy. – 2010. - Volume 84, Issue 3. – p. 179–190.
35. Hirt C. RTM Gravity Forward-Modeling Using Topography/Bathymetry Data To Improve High-Degree Global Geopotential Models In The Coastal Zone// Marine Geodesy. – 2013. - Volume 36, Issue 2. – p. 1-20.
36. Hirt C., Bürki B. Status of Geodetic Astronomy at the Beginning of the 21st Century// Wiss. Arbeiten Geodäsie und Geoinformatik, Universität Hannover. – 2006. - Nr.258. – p. 81-99.
37. Hirt C., Bürki B., Guillaume S., Featherstone W. Digital zenith cameras – state-of-the art astrogeodetic technology for Australian geodesy// FIG Congress 2010. – 2010. Sydney, Australia. Internets. - http://www.fig.net/pub/fig2010/papers/fs03h/fs03h_hirt_burki_et_al_3831.pdf
38. Hirt C., Bürki B., Somieski A., Seeber G. Modern Determination of Vertical Deflections Using Digital Zenith Cameras// Journal of Surveying Engineering. – 2010. - Volume 136, Issue 1. – p. 1-12.
39. Hirt C., Flury J. Astronomical-topographic levelling using high-precision astrogeodetic vertical deflections and digital terrain model data// Journal of Geodesy. – 2007. - Volume 82, Issue 4-5. – p. 231-248.
40. Hirt C., Marti U., Burki B., Featherstone E. Assessment of EGM2008 in Europe using accurate astrogeodetic vertical deflections and omission error estimates from SRTM/DTM2006.0 residual terrain model data// Journal of geophysical research. – 2010. - Volume 115, Issue B10.
41. Hirt C., Seeber G. Accuracy analysis of vertical deflection data observed with the Hannover digital zenith camera system TZK2-D// Journal of Geodesy. – 2008. - Volume 82, Issue 6. – p. 347–356.

42. Hirt C., Gruber T., Featherstone W.E. Evaluation of the first GOCE static gravity field models using terrestrial gravity, vertical deflections and EGM2008 quasigeoid heights// Journal of Geodesy. – 2011. - Volume 85, Issue 10. – p. 723–740.
43. Hofmann-Wellenhof B., Moritz H. Physical Geodesy// - Wien: Springer-Verlag, 2005. - 420 p.
44. Høg E., Fabricius C., Makarov V.V., Urban S., Corbin T., Wycoff G., Bastian U., Schwekendiek P, Wicenc A. The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 Million Brightest Stars// Astronomy and Astrophysics. – 2000. - Volume 355. – p. 27-30.
45. Jaeggi A., Beutler G., Meyer U., Prange L., Dach R., Mervart L. AIUB-GRACE02S: Status of GRACE Gravity Field Recovery using the Celestial Mechanics Approach// IAG Scientific Assembly 2009. – August 31- September 4, 2009. Buenos Aires, Argentina.
46. Jaeggi, A., Beutler, G., Mervart, L. GRACE Gravity Field Determination using the Celestial Mechanics Approach – First Results// IAG Symposium on "Gravity, Geoid and Earth Observation 2008". June 23-27, 2008, Chania, Greece.
47. Jäger R. DFHRS (Digital FEM Height Reference Surface) – A Rigorous Approach for the Integrated Adjustment and Fitting of Height Reference Surfaces// Forschung aktuell. - Karlsruhe: Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft, 2007. - p. 78-82.
48. Jäger R. Results of the GNSS-Heighting Test-Measurements based on the country-wide Quasi-Geoid „DFHBF_V1.0 Baltic-Sea-1977 for Moldova“// BMBF-Research and Development Project MOLDPOS. – Chisinau, 19.october, 2010. / Internets. - http://www.moldpos.eu/files/2ndtum/Results_of_the_GNSS-Heighting_Test-Measurements_2_pages_version.pdf
49. Jäger R. State of the art and present developments of a general concept for GPS-based height determination// First workshop on GPS and Mathematical geodesy in Tanzania. October 4, 1999. University College of Lands and Architectural Studies (UCLAS), Dar Es Salaam, Tanzania. / Internets. - http://www.dfhbf.de/files/JAE_GP.PDF.
50. Jäger R., Kaminskis J., Strauhmanis J., Younis G. Determination of Quasi-geoid as Height Component of the Geodetic Infrastructure for GNSS Positioning Services in the Baltic States// Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. – 2012. - Volume 3. – p. 5-15.
51. Jekeli C. An analysis of vertical deflections derived from high-degree spherical harmonic models// Journal of Geodesy. – 1999. - Volume 73, Issue 1. – p. 10-22.
52. Jekeli C., Rapp R. Accuracy of the determination of mean anomalies and mean geoid undulations from a satellite gravity field mapping mission// Department of Geodetic Science and Surveying, Report No. 307. Columbus, Ohio: The Ohio State University, 1980. - 22 p.
53. Jürgenson H. Estonian geoid and other reference surfaces// Geodezija ir Kartografija. – 2002. - Volume 28, Issue 3. – p. 108-111.
54. Jürgenson H., Liibusk A., Ellmann A. Geoid profiles in the Baltic Sea determined using GPS and sea level surface// Geodezija ir Kartografija. – 2008. - Volume 34, Issue 4. – p. 109-115.
55. Jürgenson H., Türk K., Randjäv J. Determination and evaluation of the Estonian fitted geoid model EST-GEOID 2003 Geodesy and Cartography. – 2011. - Volume 37, Issue 1. – p. 15-21.

56. Kaminskis J. Latvijas ģeoida modelis un tā attīstība. Promocijas darbs. Rīga: RTU, 2010. - 150 lpp.
57. Kaminskis J. Geoid Model for Surveying in Latvia// FIG Congress 2010. 11-16 April 2010. Sydney, Australia. / Internets. - http://www.fig.net/pub/fig2010/papers/fs01c%5Cfs01c_kaminskis_4066.pdf
58. Kaplan G., Hughes J., Seidelmann P., Smith C., Yallop B. Mean and apparent place computations in the new IAU system. III. Apparent, topocentric and astrometric places of planets and stars// The Astronomical Journal. – 1989. - Volume 97, Issue 4. – p. 1197-1210.
59. Kaplan, G. The IAU resolutions on astronomical reference systems, time scales, and earth rotation models explanation and implementation// United States Naval Observatory Circular. – 2005. – No. 459. Washington, D.C.: U.S. Naval Observatory.
60. Kiamehr R. Precise Gravimetric Geoid Model for Iran Based on GRACE and SRTM Data and the Least-Squares Modification of Stokes' Formula with Some Geodynamic Interpretations// Doctoral Dissertation in Geodesy. Stocholm: Royal Institute of Technology (KTH), Department of Infrastructure, 2006. - 89 p.
61. Kiamehr R., Eshagh. EGMLab, a scientific software for determining the gravity and gradient components from global geopotential models// Earth Science Informatics. – 2008. - Volume 1, Number 2. – p. 93-103.
62. Kudrys J. Automatic determination of the deflection of the vertical – first scientific results// Acta Geodynamica et Geomaterialia. – 2009. - Volume 6, Issue 3. – p. 233-238.
63. Kudrys J. Automatic determination of vertical deflection components from GPS and zenithal star observations// Acta Geodynamica et Geomaterialia. – 2007. - Volume 4, Issue 4. – p. 169-172.
64. Liu Q.W., Li Y.C., Sideris M.G. Evaluation of deflections of the vertical on the sphere and the plane: A comparison of FFT techniques// Journal of Geodesy. – 1997. - Volume 71, Issue 8. – p. 461-468.
65. Liu X. Global gravity field recovery from satellite-to-satellite tracking data with the acceleration approach// Publications on Geodesy 68. Delft: Nederlandse Commissie voor Geodesie, 2008. - 226 p.
66. Lyszkowicz A., Krynski J. Improved astrogravimetric geoid in Poland// The 7th International Conference "Environmental Engineering" Selected Papers, May 22-23, 2008, Vilnius, Lithuania. -Volume 3. – p. 1391-1400.
67. Machotka R., Kuruc M., Volařík, T. Local quasigeoid model creation from astrogeodetic measurements// Studia Geophysica et Geodaetica. - 2013. - Volume 57, Issue 1. – p. 27-46.
68. Mayer-Guerr T., Kurtenbach E., Eicker A. The Satellite-only Gravity Field Model ITG-Grace2010s / Internets. - <http://www.igg.uni-bonn.de/apmg/index.php?id=itg-grace2010>
69. Metzler B., Pail R. GOCE Data Processing: The Spherical Cap Regularization Approach// Studia Geophysica et Geodaetica. – 2005. - Volume 49, Issue 4. – p. 441-462.

70. Monet D., Levine S., Canzian B., Ables H., Bird A., Dahn C., Guetter H., Harris H., Henden A., Leggett S., Levison H., Luginbuhl C., Martini J., Monet A., Munn J., Pier J., Rhodes A., Riepe B., Sell S., Stone R., Vrba F., Walker R., Westerhout G., Brucato R., Reid N., Schoening W., Hartley M., Read M., Tritton S. The USNO_B catalog// *The Astronomical Journal*. – 2003. - Volume 125, Issue 2. – p. 984-993.
71. Monet D.G., Dahn C.C. CCD astrometry I: Preliminary results from the KPNO 4-M/CCD parallax program// *The Astronomical Journal*. – 1983. - Volume 88. – p. 1489–1507.
72. Moritz H. Geodetic Reference System 1980// *Journal of Geodesy*. – 2000. - Volume 74, Issue 1. – p. 128-162.
73. Nahavandchi H., Sjöberg L. Unification of vertical datums by GPS and gravimetric geoid models using modified Stokes formula// *Marine Geodesy*. – 1998. - Volume 21, Issue 4. – p. 261-273.
74. Novák P., Vaniček P., Véronneau M., Holmes S., Featherstone W. On the accuracy of modified Stokes's integration in high-frequency gravimetric geoid determination// *Journal of Geodesy*. – 2001. - Volume 74, Issue 9. – p. 644-654.
75. Ogrizovic V. A construction of an advanced measuring system for astro-geodetic determinations// *Publications of Astronomical Observatory Belgrade*. – 2009. - No. 86. – p. 145 – 150.
76. Pail R., Bruinsma S., Migliaccio F., Foerste C., Goinger H., Schuh W.-D, Hoek E, Reguzzoni M., Brockmann J.M, Abrikosov O., Veicherts M., Fecher T., Mayrhofer R., Krasbutter I., Sanso F., Tscherning C.C. First GOCE gravity field models derived by three different approaches// *Journal of Geodesy*. – 2011. - Volume 85, Issue 11. – p. 819-843.
77. Paul M.K. A method for evaluating the truncation error coefficients for geoidal heights// *Bull. Geod.* – 1973. - Volume 110. – p. 413-425.
78. Pavlis N., Holmes S., Kenyon S., Factor J. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008// *EGU General Assembly*. April 13-18, 2008. Vienna, Austria.
79. Pavlis N., Holmes S., Kenyon S., Factor J. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)// *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012). – 2012. - Volume 117, Issue B4.
80. Petroškevičius P., Paršeliūnas E. Determination of the Lithuanian territory geoid// *Geodezija ir Kartografija*. – 1995. - Volume 21, Issue 2. – p. 50-58.
81. Polgár Zs., Sujbert L., Földváry L., Asbóth P., Ádám J. Filter design for GOCE gravity gradients// *Geocarto International*. – 2013. - Volume 28, Issue 1. – p. 28-36.
82. Reilly W.I. Gravimetric interpolation of the deflection of the vertical// *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. – 1971. - Volume 14, Issue 1. – p. 109-120.
83. Sas-Uhrynowski A., Mroczek S., Sas A., Petroškevičius P., Obuchowski R., Rimkus D. Establishment of Lithuanian national gravimetric first order network// *Geodezija ir Kartografija*. – 2002. - Volume 28, Issue 3. – p. 75-82.
84. Shen W., Li J., Li J., Wang Z., Ning J., Chao D. Study on recovering the Earth's potential field based on GOCE gradiometry// *Geo-spatial Information Science*. – 2008. - Volume 11, Issue 4. – p. 273-278.
85. Silabriedis G. Eupos-Rīga Geodetic Reference Network and its Multifunctional Application. Doctor's dissertation. -Riga: Riga Technical University, 2012. - 98 lpp.

86. Sjöberg L.E. A general model of modifying Stokes' formula and its least squares solution// *Journal of Geodesy*. – 2003. - Volume 77, Issue 7-8. – p. 459-464.
87. Sjöberg L.E. A solution to the downward continuation effect on the geoid determined by Stokes' formula// *Journal of Geodesy*. – 2003. - Volume 77, Issue 1-2. – p. 94-100.
88. Sjöberg L.E. A spherical harmonic representation of the ellipsoidal correction to the modified Stokes formula// *Journal of Geodesy*. – 2004. - Volume 78, Issue 3. – p. 1432-1394.
89. Sjöberg L.E. Comparison of some methods of modifying Stokes' formula// *Boll. Geod. Sci. Aff.* – 1986. - Volume 46, Issue 2. – p. 229-248.
90. Sjöberg L.E. Least squares modification of Stokes' and Vening Meinesz' formulas by accounting for truncation and potential coefficient errors// *Manuscripta Geodaetica*. – 1984. - Volume 9. – p. 209-229.
91. Sjöberg L.E. Refined least squares modification of Stokes' formula// *Manuscripta Geodaetica*. – 1991. - Volume 16. – p. 367-375.
92. Sjöberg L.E., Nahavandchi H. The atmospheric geoid effects in Stokes' formula// *Geophysical Journal International*. – 2000. - Volume 140. – p. 95-100.
93. Sjöberg L.E., Hunegnaw A. Some modifications of Stokes' formula that account for truncation and potential coefficient errors// *Journal of Geodesy*. – 2000. - Volume 74, Issue 2. – p. 232-238.
94. Stone R. C. A comparison of digital centering algorithms// *The Astronomical Journal*. – 1989. - Volume 97. – p. 1227–1237.
95. Swenson S.C., Chambers D.P., Wahr J. Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output// *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*. – 2008. - Volume 113, Issue B8. – p. 205-229.
96. Swenson S.C., Wahr J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data// *Geophysical Research Letters*. – 2006. - Volume 33, Issue 8.
97. Tenzer R., Mikuška J., Marušiak I., Pašteka R., Karcol R., Vajda P., Sirguyev P. Computation of the atmospheric gravity correction in New Zealand// *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. – 1984. - Volume 53, Issue 4. – p. 333-340.
98. Torge W. *Geodesy*. 2nd Edition. - Berlin, New York: Walter de Gruyter, 1991. – 245 p.
99. Torge W. Regional gravimetric geoid calculations in the north sea test area// *Marine Geodesy*. – 1980. - Volume 3, Issue 1-4. – p. 257-271.
100. Tscherning C.C. Geoid modeling using collocation in Scandinavia and Greenland// *Marine Geodesy*. – 1985. - Volume 9, Issue 1. – p. 1-16.
101. Tscherning C.C., Rapp R. Closed Co variance Expressions for Gravity Anomalies, Geoid Undulations, and Deflections of the Vertical Implied by Anomaly Degree-Variance Models// Department of Geodetic Science and Surveying, Report No. 208. Columbus, Ohio: The Ohio State University, 1974. - 93 p.
102. Wahr J. Time-Variable Gravity from Satellites// Department of Physics and Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences. University of Colorado. / Internets. - http://www.gps.caltech.edu/classes/ge167/file/Wahr_Gravity_treatise.pdf

103. Wahr J., Molenaar M., Bryan F. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE// Journal of Geophysical Research. – 1998. - Volume 103, Issue B12. – p. 205-229.
104. Watts A.B., Horai K., Ribe N.M. On the determination of the deflection of the vertical by satellite altimetry// Marine Geodesy. – 1984. - Volume 8, Issue 1-4. – p. 85-127.
105. Wong L., Gore R. Accuracy of geoid heights from modified Stokes kernels// Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. – 1969. - Volume 18. – p. 81-91.
106. Yuanxi Y., Ming Z., Lijie S., Ziqing W., Zhouping W., Guichong O., Bilin X., Xiaoping W., Junqin W. Combined adjustment project of national astronomical geodetic networks and 2000' national GPS control network// Progress in Natural Science. – 2005. - Volume 15, Issue 5. – p. 435-441.
107. Zacharias N., Monet D., Levine S., Urban S., Gaume R., Wycoff G. The Naval Observatory Merged Astrometric Dataset (NOMAD)// – 2005. / Internets. - www.nofs.navy.mil/nomad.
108. Zacharias N., Zacharias M.I., Urban S.E., Høg E. Comparing tycho-2 astrometry with UCAC1// The Astronomical Journal. – 2000. - Volume 120(2). – p. 1148–1152.
109. Chesi G. Entwicklung einer tragbaren Zenitkammer und ihr Einsatz im 47. Parallel// Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Graz. - DGK C 287, 1984. - 91 p.
110. Hirt C. Entwicklung und Erprobung eines digitalen Zenitkamarasystems für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung. Ph.D. thesis. Wissen. Arb. der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik an der Universität Hannover Nr. 253, Hannover, 2004. – 188 p. / Internets. - <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dh04/393223965.pdf>.
111. Kahlmann T., Hirt C., Ingensand H. Hochpräzise Neigungsmessung mit dem elektronischen Einachspendelsystem HRTM// Ingenieurvermessung 2004. 14th International Conference on Engineering Surveying. 15. – 19. März 2004. Zürich, Deutschland.
112. Seeber G. Die transportable Zenitkamera - ein modernes Instrument zur geographischen Ortsbestimmung// Sterne und Weltraum. – 1978. – Heft2. – p. 45-50.
113. ESA Earthnet Online, GOCE / Internets. - <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational- eo-missions/goce>.
114. DFHRS. Digital finite-element height reference surface / Internets. - <http://dfhbf.de/>.
115. Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences / Internets. - <http://www.gfz-potsdam.de/portal/gfz/home>.
116. ICGEM International Center for Global Gravity Field Models / Internets. - <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>.
117. Latvijas Ģeotelpiskās informācijas aģentūra / Internets. - <http://www.lgia.gov.lv>.
118. Nordic Geodetic Commission / Internets. - <http://www.nkg.fi/>.
119. The POET interactive browser / Internets. - <http://gracetellus.jpl.nasa.gov/poet/>.
120. U.S. Geological Survey / Internets. - <http://www.usgs.gov>.

121.Universitat Bern, Astronomisches Institut / Internets. - http://www.aiub.unibe.ch/content/index_eng.html.

Par promocijas darba autori

Inese Janpaule ir dzimusi 1985. gada 12. aprīlī Daugavpilī, Latvijā. Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības fakultātes Ģeomātikas katedrā 2006. gadā iegūts inženierzinātņu bakalaura grāds būvzinātnē, 2008. gadā turpat iegūts inženierzinātņu maģistra grāds būvzinātnē (Mg.sc.ing.).

Pašreizējā darbavieta ir pētniece Latvijas Universitātes Ģeodēzijas un Ģeoinformātikas institūtā. Dalība pētniecības projektos: ESF „Zinātniskās grupas izveide unificētas satelītu lāzera tālmēra konstrukcijas izstrādei”, FP-7 „FOTONIKA-LV”, ERAF „Digitālais zenītteleskops gravitācijas lauka un tā anomāliju noteikšanai”, Eiropas Kosmosa aģentūras „EUPOS Contribution to GOCE Mission” un ERAF „Ģeogrāfisko informācijas sistēmu izstrāde Latvijas tautsaimniecībai”.

About the Author

Inese Janpaule was born in Daugavpils, Latvia on 12th of April, 1985. Acquired Bachelor of Science degree in Civil Engineering at the Riga Technical University, Department of Geomatics in 2006 and Master of Science degree in Civil Engineering (Mg.sc.ing.) in 2008.

Currently works as a researcher at University of Latvia, Institute of Geodesy and Geoinformatics. Participation in research projects: ESF „Multifunctional Optical Tracking Device for Near-Earth Object Observation”, FP-7 „FOTONIKA-LV”, ERDF „Digital Zenith Telescope for Gravity field structure data acquisition”, European Space Agency „EUPOS Contribution to GOCE Mission” and ERDF „Development of Geographical Information Systems for Latvian Economy”.

APSTIPRINĀJUMS / CONFIRMATION

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

I certify that the thesis I have presented for obtaining the doctor degree of engineering science of the Riga Technical University is my own work. The thesis has not been submitted to any other university for obtaining the scientific degree.

Inese JANPAULE(Paraksts / Signature)

Datums / Date:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 6 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 92 attēlus, kopā 127 lappuses. Literatūras sarakstā ir 121 nosaukums.

The thesis has been written in Latvian. It contains introduction, 6 chapters, conclusion and references, 92 figures, in total 127 pages. There are 121 reference in bibliography.