

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības inženierzinātņu fakultāte
Ģeomātikas katedra

RIGA TECHNICAL UNIVERSITY
Faculty of Civil Engineering
Department of Geomatics

Diāna HARITONOVA

Doktora studiju programmas “Būvniecība” doktorante
PhD Student of Doctoral Study Program “Construction”

**AUGSTAS PRECIZITĀTES TEHNOLOĢIJU
PIELIETOJUMA NOVĒRTĒJUMS ZEMES GAROZAS
KUSTĪBU NOVĒROJUMIEM LATVIJĀ**

Promocijas darba KOPSAVILKUMS

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

**EVALUATION OF HIGH-PRECISION TECHNIQUE
APPLICATION FOR OBSERVATIONS OF EARTH'S CRUST
MOVEMENTS IN LATVIA**

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**

RTU Izdevniecība / RTU Press
Rīga 2016

Haritonova D. Augstas precizitātes tehnoloģiju pielietojuma novērtējums Zemes garozas kustību novērojumiem Latvijā. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2016. – 68 lpp.

Haritonova D. Evaluation of High-Precision Technique Application for Observations of Earth's Crust Movements in Latvia. Summary of the Doctoral Thesis. – Rīga: RTU Press, 2016. – 68 p.

Iespiests saskaņā ar RTU Būvniecības inženierzinātņu fakultātes Ģeomātikas katedras 2016. gada 31. marta lēmumu, protokols Nr. 16/4.

Printed according to the decision of the Department of Geomatics of the Faculty of Civil Engineering as of 31 March 2016, Minutes No. 16/4.

VISPĀRĒJĀ INFORMĀCIJA

Promocijas darbs izstrādāts Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātes Ģeomātikas katedrā laika posmā no 2012. līdz 2016. gadam.

Oficiālie recenzenti:

Dr. sc. ing. Eimuntas Kazimieras PARŠELIŪNAS, Viļņas Ģedimina Tehniskās universitātes Ģeodēzijas un kadastra katedras profesors (Lietuva);

Ph. D. Harli JURGENSON, Igaunijas Dzīvības Zinātņu universitātes Ģeomātikas katedras asociētais profesors (Igaunija);

Dr. sc. ing. Modris DOBELIS, Rīgas Tehniskās universitātes Datorizētās inženiergrafikas katedras vadītājs, profesors (Latvija).

Promocijas padomes “RTU P-06” sastāvs:

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

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

Dr. sc. ing. Andris ČATE;

Dr. sc. ing. Modris DOBELIS;

Dr. sc. ing. Ainārs PAEGLĪTIS;

Dr. sc. ing. Ivars RADIŅŠ;

Dr. sc. ing. Juris SMIRNOVS;

Dr. sc. ing. Jānis KAMINSKIS;

Dr. sc. ing. Dmitrijs SERDJUKS;

Dr. sc. ing. Jevgēnijs BARKANOVŠ;

Dr. sc. ing. Leonīds PAKRASTIŅŠ;

Dr. sc. ing. Mārtiņš ZAUMANIS;

Dr. habil. sc. ing. Jānis BRAUNS.

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. gada 16. decembrī plkst. 14.15 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, Ķīpsalas ielā 6A/6B, sēžu zālē.

Ar promocijas darbu un kopsavilkumu iespējams iepazīties RTU Zinātniskajā bibliotēkā, Paula Valdena ielā 5, un tiešsaistē <http://www.rtu.lv/> sadaļā “Zinātne”.

GENERAL INFORMATION

The **Doctoral Thesis** has been developed at the Department of Geomatics of the Faculty of Civil Engineering of Riga Technical University from 2012 to 2016.

Official reviewers

Dr. sc. ing. Eimuntas Kazimieras PARSELIUNAS, Professor of the Department of Geodesy and Cadastre in Vilnius Gediminas Technical University (Lithuania)

Ph. D. Harli JURGENSON, Associate Professor of the Department of Geomatics in Estonian University of Life Sciences (Estonia)

Dr. sc. ing. Modris DOBELIS, Professor, Head of the Department of Computer Aided Engineering Graphics in Riga Technical University (Latvia)

Promotion board of “RTU P-06”

Dr. habil. sc. ing. Karlis ROCENS, Chairman of the Promotion Board

Dr. sc. ing. Diana BAJARE, Secretary of the Promotion Board

Dr. sc. ing. Andris CATE

Dr. sc. ing. Modris DOBELIS

Dr. sc. ing. Ainars PAEGLITIS

Dr. sc. ing. Ivars RADINS

Dr. sc. ing. Juris SMIRNOVS

Dr. sc. ing. Janis KAMINSKIS

Dr. sc. ing. Dmitrijs SERDJUKS

Dr. sc. ing. Jevgenijs BARKANOVS

Dr. sc. ing. Leonids PAKRASTINS

Dr. sc. ing. Martins ZAUMANIS

Dr. habil. sc. ing. Janis BRAUNS

The defence of the present Doctoral Thesis will take place in a public meeting on December 16, 2016, at 14:15, in the Assembly Hall of the Faculty of Civil Engineering of Riga Technical University, Ķīpsalas iela 6A/6B.

The Doctoral Thesis and the Summary of the Thesis are available at the RTU Scientific Library, Paula Valdena iela 5, and online at <http://www.rtu.lv/en/> under the section “Science”.

SATURS / CONTENTS

VISPĀRĒJĀ INFORMĀCIJA	3
GENERAL INFORMATION.....	4
DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	8
Tēmas aktualitāte un pētījuma problēmas nostādne.....	8
Darba mērķis.....	8
Darba uzdevumi.....	9
Pētījuma zinātniskā novitāte	9
Promocijas darba praktiskais nozīmīgums	10
Pētīšanas metodika.....	11
Pētījumu teorētiskā un metodoloģiskā bāze	11
Pētījuma diapazons un iegūto rezultātu lietojuma robežas.....	11
Aizstāvēšanai izvirzītie darba rezultāti	12
Promocijas darba sastāvs un apjoms	12
PĒTĪJUMA REZULTĀTU APROBĀCIJA	13
Zinātniskās publikācijas.....	13
Ziņojumi starptautiskās zinātniskās konferencēs	13
PROMOCIJAS DARBA SATURS	16
1. ĢEODINAMIKA	16
Garozas mūsdienu kustības.....	16
Atbalsta sistēmas definēšana.....	16
Pēcglaciālā noregulēšanās.....	17
Okeānu plūdmaiņu efekts	19
2. GNSS.....	19
Ievads.....	20
Relatīvā pozicionēšana.....	20
3. ZEMES VIRSMAS KUSTĪBAS LATVIJAS GNSS STACIJĀS.....	21
Dalība <i>EUPOS[®] ECC</i>	21
Latvijas GNSS tīkli.....	21
Tīkla risinājums un datu apstrāde	22
Rezultāti un analīze.....	23

4. JŪRAS LĪMEŅA SVĀRSTĪBAS LATVIJAS PIEKRASTES HIDROLOĢISKAJĀS STACIJĀS	26
Datu izvēle un apstrāde	26
Rezultāti un analīze	27
5. JAUNAS MULTIFUNKCIONĀLĀS OPTISKĀS NOVĒROŠANAS SISTĒMAS PROJEKTĒŠANA	29
Metodes un to nozīmīgums	30
Jauna instrumenta projektēšana	30
Lauka testi un montāžas kļūdu modelis	31
GALVENIE SECINĀJUMI	33
GENERAL REVIEW OF THE DOCTORAL THESIS	34
Subject topicality and formulation of the problem	34
Objective of the Doctoral Thesis	35
Tasks of the Thesis	35
Scientific novelty of the Thesis	35
Practical relevance of the Doctoral Thesis	36
Methodology of the research	37
Theoretical and methodological bases of the research	37
Scope of the study	38
Results presented for the defence	38
Structure of the Doctoral Thesis	38
APPROBATION OF THE RESEARCH RESULTS	39
Scientific publications	39
Reports at international scientific conferences	40
CONTENTS OF THE THESIS	42
1. GEODYNAMICS	42
Recent crustal movements	42
Reference frame definition	42
Postglacial rebound	43
Effect of the ocean tides	45
2. GNSS	46
Introduction	46
Relative positioning	46

3. EARTH'S SURFACE MOVEMENTS AT THE LATVIAN GNSS STATIONS.....	47
Participation in EUPOS® ECC.....	47
Latvian GNSS networks	48
Network solution and data processing	48
Results and discussion	50
4. SEA LEVEL VARIATIONS AT THE LATVIAN COASTAL HYDROLOGICAL STATIONS.....	53
Data selection and processing.....	53
Results and discussion	54
5. DESIGN OF A NEW MULTI-PURPOSE OPTICAL TRACKING SYSTEM.....	56
Methods and their importance.....	56
Design of the new instrument	56
Field tests and mount error model.....	57
MAIN CONCLUSIONS.....	59
PROMOCIJAS DARBA LITERATŪRAS ATSAUCES/	60
LIST OF REFERENCES OF THE THESIS.....	60
APSTIPRINĀJUMS / CONFIRMATION.....	68

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte un pētījuma problēmas nostādne

Ģeodēzija, kuras galvenais uzdevums ir mērīt planētu Zeme, pieredzējusi ievērojamu attīstību pēdējo 60 gadu laikā, sākot no 1957. gada, kad orbītā tika palaists pirmais Zemes mākslīgais pavadoņs. Kopš tā laika tūkstošiem atšķirīgas formas un nestspējas satelītu tika palaisti dažādās orbītās dažādu izpētes misiju veikšanai.

NAVSTAR (Navigācijas sistēma laika un attāluma noteikšanai) Globālās Pozicionēšanas Sistēmas (GPS) pirmais satelīts tika palaists 1978. gadā. Pateicoties GPS satelītu novērojumu attīstībai, 1991. gadā tika nodibināta jauna starptautiska organizācija – Starptautiskais GPS serviss, kuras mērķis bija vākt GPS novērojumu rezultātus visā pasaulē, patlaban tās nosaukums ir Starptautiskais GNSS (Globālās Navigācijas Satelītu Sistēmas) serviss (*IGS*). Tika nodibināts arī Starptautiskais lāzerlokācijas serviss (*ILRS*) un Starptautiskais ļoti garas bāzes radiointerferometrijas serviss (*IVS*).

Šādas starptautiskās zinātniskās sadarbības pamatā tika izveidota Starptautiskā Zemes atbalsta sistēma (*ITRF*), kas kļuva par nepārtraukta monitoringa objektu. Tagad, pateicoties satelītu novērojumu laika sēriju vākšanai un analīzei, ir parādījusies iespēja veikt katras valsts teritorijas detalizētus pētījumus.

Mūsdienās satelītu orbītu mērījumu atgriezeniskā saite uz punkta pozīcijas novērojumiem sniedz lielisku iespēju koordinātu noteikšanā ar milimetru precizitāti. Tas ļauj detalizēti izpētīt Zemes formu un iegūt nepieciešamos datus tās iekšējās struktūras pētījumiem. Turklāt, atkārtoti veicot ģeodēziskos novērojumus, ir iespējams noteikt nozīmīgas izmaiņas, kas notiek uz Zemes, tādas kā kontinentu kustības, Zemes virsmas horizontālie un vertikālie pārvietojumi, okeānu un jūru krastu līniju izmaiņas, kā arī identificēt citus ģeodinamiskus procesus.

Kosmiskās ģeodēzijas tehnoloģiju izmantošana zinātnēs, kas saistītas ar planētas Zeme pētījumiem, sniedz aizvien lielākus praktiskus ieguvumus cilvēkiem visā pasaulē. Viens no šādiem ieguvumiem ir spēja izveidot vienotu Zemes koordinātu telpu. Tā kā Zemes virsma sadalīta tektoniskās plātnēs un tiek iespaidota no to iekšējām spriedzēm, vienotā koordinātu telpa tiek deformēta. Visgrūtākais uzdevums ir noteikt izmaiņas koordinātu augstuma komponentei. Jo vairāk tādēļ, ka Zemes virsmas ģeodinamiskās pārmaiņas pakļautas gravitācijas spēka ietekmei no Saules, Mēness un citiem objektiem, globālām un vietējām masu sadalījuma izmaiņām, kā arī globālām un sezonālām klimata izmaiņām. Tāpēc augstuma komponentes noteikšana un tās izmaiņu attēlošana pašreiz piesaista zinātnisko interesi.

Darba mērķis

Darba mērķis ir izpētīt Zemes garozas ģeodinamiskus procesus Latvijas teritorijā, kas notiek Fennoskandijas zemes pacelšanās efekta ietekmē Baltijas jūras krastā, izmantojot Latvijas GNSS pastāvīgās darbības staciju koordinātu laika sērijas, aprēķinātas attiecībā pret *EUREF* pastāvīgās darbības tīklu (*EPN*), un iegūstot Zemes garozas pārvietojumus, kā arī uzprojektēt papildu monitoringa iekārtu, paredzētu novērojumiem Starptautiskā lāzerlokācijas servisa (*ILRS*) tīklā.

Darba uzdevumi

Lai sasniegtu darba mērķi, ir dots šādu izvirzīto uzdevumu risinājums:

- 1) aprēķināt *EUPOS*[®]-*Riga* un *LatPos* pastāvīgās darbības staciju koordinātas attiecībā pret *EUREF* pastāvīgās darbības tīklu (*EPN*), ievērojot dažādu efektu ietekmi, un apkopot rezultātus visam novērojumu periodam no 2008. līdz 2015. gadam, sniedzot staciju horizontālo un vertikālo ātrumu vērtības;
- 2) izveidot katalogu ar informāciju par *EUPOS*[®]-*Riga* un *LatPos* staciju izvietojumu un to pozīciju izmaiņu laika sērijām;
- 3) novērtēt Latvijas GNSS staciju pārvietojumu atbilstību datiem no deformācijas modeļa *NKG_RF03vel*;
- 4) raksturot ūdens līmeņa svārstības Baltijas jūrā Latvijas piekrastē, balstoties uz hidroloģisko staciju novērojumu datiem un izmantojot spektrālo analīzi;
- 5) uzprojektēt eksperimentālo instrumentu jaunai oriģinālai multifunkcionālai optiskai novērošanas sistēmai, kas paredzēta Zemei tuvo objektu pozicionāliem un lāzertālmēra novērojumiem.

Pētījuma zinātniskā novitāte

Darba zinātniskā novitāte balstās uz šādiem sasniegumiem:

- 1) pirmo reizi ir apkopoti dati par Latvijas GNSS staciju horizontālo un vertikālo ātrumu laukiem kā pamats augstas precizitātes koordinātu noteikšanai;
- 2) izveidots katalogs, kas ietver informāciju par *EUPOS*[®]-*Riga* un *LatPos* staciju izvietojumu un to pozīciju izmaiņu laika sērijām. Saskaņā ar to ir dots slēdziens par GNSS staciju stabilitāti;
- 3) novērtēta Latvijas GNSS staciju pārvietojumu atbilstība datiem no deformācijas modeļa *NKG_RF03vel*;
- 4) ir dots jūras līmeņa svārstību Latvijas piekrastē raksturojums, kas papildina iepriekš iegūtos rezultātus par Baltijas jūras dinamiku šajā reģionā, jo balstās uz novērojumiem, kas ir iegūti gar visu Latvijas piekrastes zonu, kā arī tas veido potenciālas iespējas, lai sekmētu turpmāko izpēti par Baltijas jūras spiediena ietekmi uz GNSS koordinātu laika sērijām;
- 5) uzprojektēta inovatīva un universāla satelītu lāzertālmēra iekārta ar oriģinālo optisko shēmu, kas ietver trīs optiskos kanālus, t. i., vienu raidītāju un divus uztvērējus. Viena no divām optiskajām sistēmām ir aprīkota ar *CCD* un tiek izmantota astrometriskiem mērķiem, savukārt otra ir aprīkota ar atstarotās gaismas impulsa detektoru un tiks izmantota *SLR* impulsa apstrādei. Jauna satelītu lāzertālmēra iekārta nodrošina efektīvu pieeju nozīmīgu ģeodinamisko datu iegūšanai vertikālo kustību pētījumiem globālajā *ILRS* tīklā.

Promocijas darba praktiskais nozīmīgums

Tāpat kā citas Eiropas Savienības dalībvalstis, arī Latvijas ģeotelpiskās informācijas aģentūra (LĢIA) no Latvijas puses sadarbībā ar Starptautiskās ģeodēzijas asociācijas (*IAG*) reģionālās atbalsta sistēmas apakškomisiju Eiropai (*EUREF*) strādā pie modernas un precīzas kontinentālas atbalsta sistēmas realizācijas Eiropā, ierīkojot un uzturot Eiropas Zemes atbalsta sistēmu (*ETRS89*) un Eiropas vertikālo atbalsta sistēmu (*EVRS*). *ETRS89* visai Eiropai nodrošina ģeocentriskās trīsdimensionālas pozīcijas ar milimetru precizitāti homogēnā atbalsta sistēmā, un *EVRS* dara to pašu attiecībā uz augstuma komponenti. Šīs sistēmas veido bāzi ģeoreferencēšanai visā Eiropā. *ETRS89* sistēmu parasti izmanto mūsdienu kartēšanas un Zemes zinātņu vajadzībām. *EUREF* pastāvīgās darbības tīkls (*EPN*) kā galvenais instruments *ETRS89* uzturēšanā rada nosacījumus Eiropas sadarbībai ar Starptautisko GNSS servisu (*IGS*) un sekmē Starptautiskās Zemes atbalsta sistēmas (*ITRF*) realizāciju, kā arī tektonisko deformāciju novērojumus Eiropā, ilgstošu klimata monitoringu, standartu un operatīvo līdzekļu attīstību GNSS datu izplatīšanai (*EUREF*, 2008).

Sasniedzot promocijas darbā izvirzīto mērķi, galvenais praktiskais ieguvums ir dati par Latvijas GNSS staciju horizontālo un vertikālo ātrumu laukiem, kas sniedz priekšstatu par ģeodinamiskiem procesiem Fennoskandijas zemes pacelšanās efekta ietekmē Latvijas teritorijā un nodrošina pamatu augstas precizitātes koordinātu noteikšanai.

Šajā darbā dotais slēdziens par GNSS staciju stabilitāti saskaņā ar izveidotā kataloga datiem un staciju koordinātu vidējo kvadrātisko kļūdu vērtībām var kalpot par pamatu jaunas GNSS staciju ierīkošanas vietas izvēlē.

Dotais jūras līmeņa svārstību Latvijas piekrastē raksturojums varētu sekmēt turpmāko izpēti par Baltijas jūras spiediena ietekmi uz GNSS koordinātām laika sērijās.

Ģeodēzisko un ģeodinamisko parametru noteikšanas precizitātes pieaugošās prasības, kā arī ģeopotenciāla modeļu, nutācijas un slodzes parādību modeļu nepārtraukta uzlabošana rada nepieciešamību pēc zinātniskiem pētījumiem, kas saistīti ar monitoringa procedūras dažādu stratēģiju salīdzinošu analīzi. Tā kā katrai no kosmiskās ģeodēzijas tehnoloģijām (GNSS, *SLR* u. c.) piemīt savas īpatnības un priekšrocības, nosakot dažādus parametrus, ļoti svarīgi optimāli kombinēt visus novērojumu līdzekļus.

Promocijas darba izstrādes kalpo par pamatu, kas nepieciešams, lai turpmāk varētu izmantot GNSS un *SLR* novērojumus vienā kombinācijā. Turklāt, tā kā uzprojektētā jauna satelītu lāzertālmēra iekārta var būt mobila, tā sniedz iespēju veikt novērojumus dažādos punktos, tādā veidā nodrošinot Starptautiskā lāzerlokācijas servisa (*ILRS*) tīkla sabiezināšanu.

Pētīšanas metodika

Promocijas darba izstrādes procesā izmantotas šādas pētījumu metodes:

- a) monogrāfiskā jeb aprakstošā pētījumu metode – izmantota pētījuma problēmas izpētei un raksturošanai, apkopojot informāciju un pamatojoties uz literatūras avotiem;
- b) skaitliskā metode – lietota GNSS novērojumu parametru aprēķināšanā (*Bernese GPS Software version 5.0, Bernese GNSS Software version 5.2*), kā arī zvaigžņu attēlu nolasīšanas un apstrādes laikā (Latvijas Universitātes Ģeodēzijas un ģeoinformātikas institūtā izstrādātā programmatūra);
- c) datu matemātiskās statistikas metode – lietota GNSS staciju koordinātu transformāciju veikšanā, ātrumu un koordinātu vidējo kvadrātisko kļūdu aprēķināšanā (*Microsoft Excel, Fortran* izpildāmais kods);
- d) analīzes un sintēzes metode – lietota GNSS staciju ātrumu starpību raksturošanā, kā arī jūras līmeņa dinamikas Latvijas piekrastē īpašību aprakstīšanā;
- e) spektrālās analīzes metode – lietota diennakts un pus-diennakts plūdmaiņu viļņu identificēšanā jūras līmeņa laika sērijās (*Fortran* izpildāmais kods);
- f) grafiskā metode – izmantota, lai uzskatāmi atainotu aprakstītos un analizētos procesus (*Microsoft Excel, SELEN 2.9, GMT – The Generic Mapping Tools, MicroStation V8i, Solid Edge ST5*).

Pētījumu teorētiskā un metodoloģiskā bāze

Promocijas darbā veiktie pētījumi balstās uz šādām zinātņu nozarēm un apakšnozarēm:

- ģeodēzija un ģeoinformātika;
- ģeodinamika;
- hidroloģija;
- ģeokosmiskie pētījumi;
- fundamentālā astronomija;
- matemātika;
- datorzinātne;
- optika;
- mehānika.

Pētījuma diapazons un iegūto rezultātu lietojuma robežas

Aprēķinātās *EUPOS*[®]-*Riga* un *LatPos* staciju koordinātas attiecībā pret *EUREF* pastāvīgās darbības tīklu (*EPN*) un apkopotie staciju horizontālie un vertikālie ātrumi balstās uz astoņu gadu ilgiem GNSS novērojumiem, t. i., no 2008. līdz 2015. gadam. Kopumā ir apskatītas 30 Latvijas teritorijā izvietoto staciju koordinātu laika sērijas. Ir doti divi risinājumi: *EUPOS*[®] kombinēšanas centra (*ECC*) kumulatīvais iknedēļas risinājums (2008.–2014.) un pārrēķinātais ikdienas risinājums (2012.–2015.). Aprēķini tika veikti, izmantojot datu pēcapstrādes programmatūru *Bernese* un pielietojot Diferenciālās GNSS (relatīvās) apstrādes

metodi. Staciju horizontālie ātrumi doti *ETRF2000* sistēmā, vertikālās komponentes ātrumi – gan *ETRF2000*, gan *ITRF2008* sistēmā.

Dotais jūras līmeņa svārstību Latvijas piekrastē raksturojums balstās uz septiņu hidroloģisko staciju novērojumiem. Tās ir Liepāja, Ventspils, Kolka, Mērsrags, Lielupes grīva, Daugavgrīva un Salacgrīva. Jūras līmeņa dati ir stundas pēdējo 15 minūšu vidējās vērtības. Novērojumu periods aptver trīs gadus (2013.–2015.), kas ir pietiekami garš, lai varētu raksturot jūras līmeņa izmaiņas, kas notiek viena gada laikā, un identificēt četrus galvenos plūdmaiņu viļņus (O_1 , K_1 , M_2 , S_2).

Viens no galvenajiem uzprojektētā eksperimentālā instrumenta konstruktīviem mērķiem ir lāzertālmēra funkcionalitātes nodrošinājums. Aprēķinātā kļūdu modeļa pielietojums nodrošināja pozicionēšanas rezultējošo precizitāti kopumā 10"–20" robežās, kas jau varētu būt pietiekama automātiskā ("aklā") režīma zemo orbītu satelītu novērojumiem. Paredzēts, ka montāžas mehānikas turpmākā iestādīšana un montāžas kļūdu modeļa struktūras uzlabojumi uzlabos pozicionēšanas precizitāti līdz 5"–10" vai labāk.

Aizstāvēšanai izvirzītie darba rezultāti

Šādi darba rezultāti bija sasniegti promocijas darba izstrādes procesā:

- 1) Latvijas GNSS staciju horizontālo un vertikālo ātrumu lauku dati;
- 2) katalogs ar informāciju par *EUPOS[®]-Riga* un *LatPos* staciju izvietojumu un to pozīciju izmaiņu laika sērijām;
- 3) Latvijas GNSS staciju pārvietojumu atbilstības raksturojums datiem no deformācijas modeļa *NKG_RF03vel*;
- 4) jūras līmeņa svārstību Latvijas piekrastē raksturojums;
- 5) uzprojektētā inovatīva un universāla satelītu lāzertālmēra iekārta.

Promocijas darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbs ir patstāvīgs zinātnisks pētījums. Tajā ir anotācija, ievaddaļa, piecas nodaļas, galvenie secinājumi, divi pielikumi un izmantotās literatūras saraksts ar 111 avotiem. Darbā ir 61 attēls, 26 formulas un deviņas tabulas. Darba kopējais apjoms ir 136 lappuses.

PĒTĪJUMA REZULTĀTU APROBĀCIJA

Zinātniskās publikācijas

- 1) Haritonova, D., 2016. Sea level variations at the Latvian coastal hydrologic stations. *Geodesy and Cartography* 42 (2): 31–38 (*indeksēta SCOPUS datubāzē*).
- 2) Balodis, J., Silabriedis, G., Haritonova, D., Morozova, K., Zarins, A. and Rubans, A., 2016. Recent research activities at the Institute of Geodesy and Geoinformatics. *Proc. of ESA Living Planet Symposium*, ESA SP-740: 5 pages.
- 3) Zariņš, A., Haritonova, D., Rubans, A., Silabriedis, G. and Zvirgzds, J., 2016. Field tests of astrometric subsystem. *Geodesy and Cartography* 42 (1): 1–6 (*indeksēta SCOPUS datubāzē*).
- 4) Haritonova, D., Balodis, J., Janpaule, I. and Morozova, K., 2015a. Earth's surface displacements from the GPS time series. *Proc. of the 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 96: 10 pages (*indeksēta Web of Science datubāzē*).
- 5) Balodis, J., Silabriedis, G., Haritonova, D., Kaļinka, M., Janpaule, I., Morozova, K., Jumare, I., Mitrofanovs, I., Zvirgzds, J., Kaminskis, J. and Liepiņš, I., 2015. Development of the one centimeter accuracy geoid model of Latvia for GNSS measurements. *Proc. of the 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 96: 9 pages (*indeksēta Web of Science datubāzē*).
- 6) Janpaule, I., Haritonova, D., Balodis, J., Zarins, A., Silabriedis, G. and Kaminskis, J., 2015. Improvement of Latvian geoid model using GNSS/levelling, GOCE data and vertical deflection measurements. *Proc. of 5th International GOCE User Workshop*, ESA SP-728: 4 pages.
- 7) Balodis, J., Zarins, A., Haritonova, D. and Janpaule, I., 2014. Parameters for automated star identification. *Geodesy and Cartography* 40 (4): 163–170 (*indeksēta SCOPUS datubāzē*).
- 8) Balodis, J., Haritonova, D., Janpaule, I., Normand, M., Silabriedis, G., Zarins, A., Rubans, A., Kalinka, M., Jumare, I. and Lasmane, I., 2013. On the geodynamics in Latvia. *Proc. of ESA Living Planet Symposium*, ESA SP-722: 8 pages.
- 9) Haritonova, D., Balodis, J., Janpaule, I. and Normand, M., 2013. Displacements at the GNSS stations. *Proc. of 4th International Scientific Conference "Civil Engineering'13"*, Latvia University of Agriculture: 5 pages.
- 10) Haritonova, D., 2012. Solid Earth tides in the territory of Latvia. *RTU Scientific Proceedings "ĢEOMĀTIKA"*, Riga: 5 pages.

Ziņojumi starptautiskās zinātniskās konferencēs

- 1) Haritonova, D., Balodis, J., Zarins, A. and Rubans, A. High precision techniques for Earth's crust movement observations in Latvia. *EUREF Symposium, 25–27 May 2016*, Donostia – San Sebastian: poster.

- 2) Haritonova, D. and Balodis, J. Earth's surface displacements from the GPS time series. *2nd International Conference: Innovative Materials, Structures and Technologies*, 30 September – 2 October 2015, Riga: presentation.
- 3) Balodis, J., Zarins, A., Rubans, A., Haritonova, D. and Kaminskis, J. Digital zenith camera – a new astrometric instrument for precision measurements in geodesy. *The FOTONIKA-LV conference "Achievements and Future prospects"*, 23–24 April 2015, Riga: presentation.
- 4) Haritonova, D., Zarins, A., Rubans, A. and Janpaule, I. Project of multi-purpose optical tracking system: design and deformations of optical system's transmitting path. *The FOTONIKA-LV conference "Achievements and Future prospects"*, 23–24 April 2015, Baldone: poster.
- 5) Haritonova, D., Janpaule, I., Rubans, A. and Zarins, A., 2015b. Project of multi-purpose optical tracking system. *EGU General Assembly*, 12–17 April 2015, Vienna: poster.
- 6) Haritonova, D. Earth tide observations and analysis methods. *73rd Annual Scientific Conference of the University of Latvia*, Section: The Project "FOTONIKA-LV – FP7-REGPOT-CT-2011-285912" – the third year scientific outcomes, 6 February 2015, Riga: poster.
- 7) Janpaule, I., Haritonova, D., Zarins, A. and Balodis, J. Improvement of Latvian geoid model using GOCE data and vertical deflection measurements. *5th International GOCE User Workshop*, 25–28 November 2014, Paris: poster.
- 8) Haritonova, D., Zarins, A., Rubans, A. and Janpaule, I. Project of multi-purpose optical tracking system: design and deformations of optical system's transmitting path. *1st International Conference "Nocturnal Atmosphere, Remote Sensing and Laser Ranging: NOCTURNAL – Riga 2014"*, 16–22 October 2014, Riga: poster.
- 9) Haritonova, D., Balodis, J., Zarins, A., Rubans, A. and Janpaule, I. Application of GNSS observation results to determination of the ground deformations. *EUREF Symposium*, 3–7 June 2014, Vilnius: poster.
- 10) Haritonova, D., Balodis, J., Janpaule, I., Jumare, I. and Normand, M. Earth's surface movements in Latvia. *72nd annual scientific conference of University of Latvia*, Section: The Project "FOTONIKA-LV – FP7-REGPOT-CT-2011-285912" – the second year scientific outcomes, 7 February 2014, Riga: poster.
- 11) Haritonova, D., Balodis, J. and Janpaule, I. Investigating effects in GNSS station coordinate time series. *"Innovative Materials, Structures and Technologies" in the framework of the 54th International Conference of Riga Technical University*, dedicated to the 150th Anniversary of the Faculty of Civil Engineering of Riga Technical University, 8 November 2013, Riga: presentation.
- 12) Balodis, J., Haritonova, D., Janpaule, I., Normand, M., Silabriedis, G., Zarins, A., Rubans, A., Kalinka, M., Jumare, I. and Lasmane, I. On the geodynamics in Latvia. *ESA Living Planet Symposium*, 9–13 September 2013, Edinburgh: poster.
- 13) Haritonova, D., Balodis, J., Janpaule, I. and Normand, M. Displacements at the GNSS stations. *International scientific conference "Civil Engineering'13"*, 16–17 May 2013, Jelgava: presentation.

- 14) Haritonova, D., Balodis, J., Janpaule, I. and Normand, M. GNSS station displacement analysis. *EGU General Assembly*, 7–12 April 2013, Vienna: poster.
- 15) Haritonova, D., Kaminskis, J. and Lasmane, I. Analysis of kinematic coordinates from GNSS stations in Latvia. *NKG Science Week*, 12–14 March 2013, Reykjavik: presentation.
- 16) Haritonova, D. GNSS station kinematic coordinate analysis. *71st annual scientific conference of University of Latvia*, Natural sciences photonics, 1 February 2013, Riga: poster.
- 17) Haritonova, D. GNSS station kinematic coordinate analysis. *Riga Technical University 53rd International Scientific Conference*, dedicated to the 150th Anniversary, the 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute / RTU Alumni, 11–12 October 2012, Riga: presentation.
- 18) Haritonova, D. The impact of solid Earth tides on the DGNSS positioning results. *United Nations / Latvia Workshop on the Applications of Global Navigation Satellite Systems*, 14–18 May 2012, Riga: presentation.

PROMOCIJAS DARBA SATURS

Promocijas darba ievadā ir formulēta tēmas aktualitāte, zinātniskā novitāte, dots promocijas darba mērķis ar izvirzītajiem uzdevumiem tā sasniegšanai un darba praktiskais nozīmīgums.

1. ĢEODINAMIKA

Ģeodinamika ir zinātne, kas pēta sistēmā Zeme notiekošus procesus. Šajā nodaļā ir apskatītas tādas tēmas, kā garozas kustības, atbalsta sistēmas, pēcglaciālā noregulēšanās un okeānu plūdmaiņas.

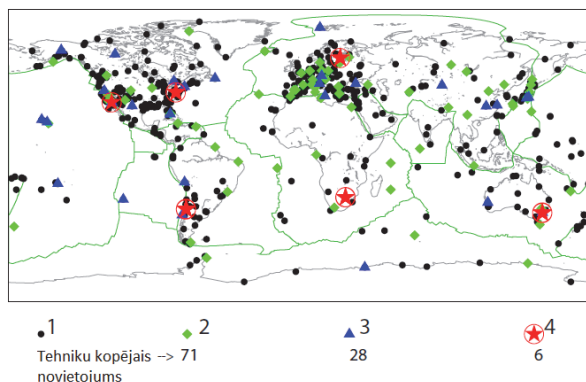
Garozas mūsdienu kustības

Uz satelītiem bāzēto ģeodēziskās pozicionēšanas tehnoloģiju pieaugošā precizitāte ļauj iegūt informāciju par garozas kustībām, veicot atkārtotus vai nepārtrauktus novērojumus. Iedala šādas garozas kustību monitoringa pielietojumu galvenās sfēras (Seeber, 2003):

- a) globālās un kontinentālās plātņu kustības un deformāciju analīze;
- b) garozas reģionālo kustību analīze;
- c) deformāciju un nosēšanas vietējās nozīmes monitorings.

Atbalsta sistēmas definēšana

Konvencionālā Zemes atbalsta sistēma, ko izveidoja un nodrošina Starptautiskais Zemes rotācijas un atbalsta sistēmu serviss (*IERS*), un ko izmanto mūsdienu zinātniskiem un praktiskiem mērķiem, ir Starptautiskā Zemes atbalsta sistēma (*ITRS*); tās realizācija ir *ITRF*.



1.1. attēls. *ITRF2008* vietas un tehniku kopējais novietojums: 1 tehnika apzīmēta ar apli, 2 tehniku kopējais novietojums – rombs, 3 – trīsstūris un 4 – zvaigzne (Petit, Luzum, 2010).

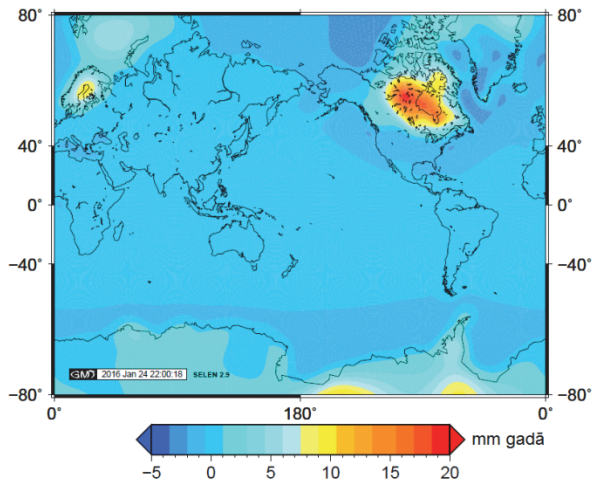
Katra jauna *ITRF* versija ir realizēta, pateicoties jauniem novērojumiem, iegūtiem no kosmiskās ģeodēzijas tehnoloģijām, tādām, kā *DORIS*, *GPS*, *SLR* un *VLBI* (*Seeber*, 2003). 1.1. attēls atspoguļo sistēmu *ITRF2008*; tā sastāv no 934 stacijām, kas izvietotas 580 vietnēs.

Mūsdienu kosmiskās ģeodēzijas tehnoloģijas nodrošina staciju koordinātas ar 1 cm vai arī subcentimetra precizitāti, tāpēc ir svarīgi modelēt dažādas deformācijas ar milimetru precizitāti. Galvenie ietekmes faktori ir globālā plātņu tektonika, cietās Zemes plūdmaiņas, okeānu un atmosfēras spiediena efekti, pola plūdmaiņas, reģionālie un lokālie efekti.

Saskaņā ar *Boucher et al.* (1992) no katras ikgadējās *ITRFyy* var iegūt attiecīgo realizāciju *ETRS89* sistēmā ar nosaukumu *ETRFyy*, kas ir *ITRS* sistēmas reģionālā realizācija Eiropai.

Pēglaciālā noregulēšanās

Fennoskandijā un Kanādā Zemes garoza nepārtraukti ceļas, sākot ar ledāja spiediena izzušanu ledus laikmeta beigās (skat. 1.2. attēlu). Šī parādība ir ļoti pazīstama kā pēglaciālā noregulēšanās vai pēglaciālā Zemes virskārtas pacelšanās. Tā galvenokārt ir izostatiskā noregulēšanās, kas saistīta ar mantijas viskozām īpašībām, zināmā mērā modificētā elastīgās garozas dēļ (*Kakkuri*, 1993).

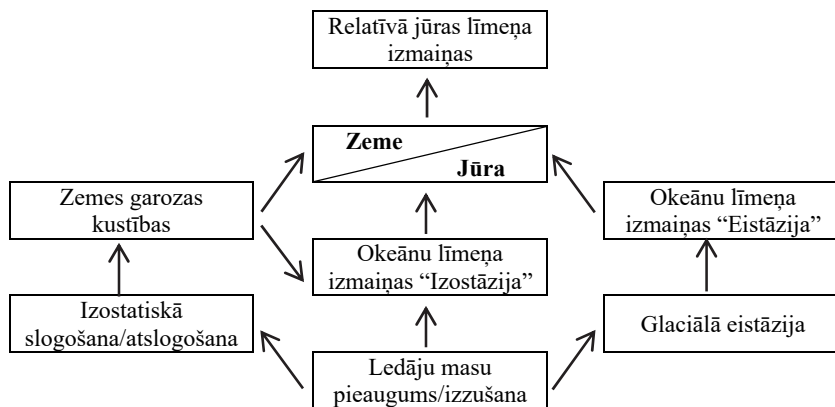


1.2. attēls. Mūsdienu pasaules karte ar vertikālo pārvietojumu ātrumiem *GIA* efekta ietekmē: no -3,5 mm līdz +19,2 mm gadā (*Spada, Melini*, 2013).

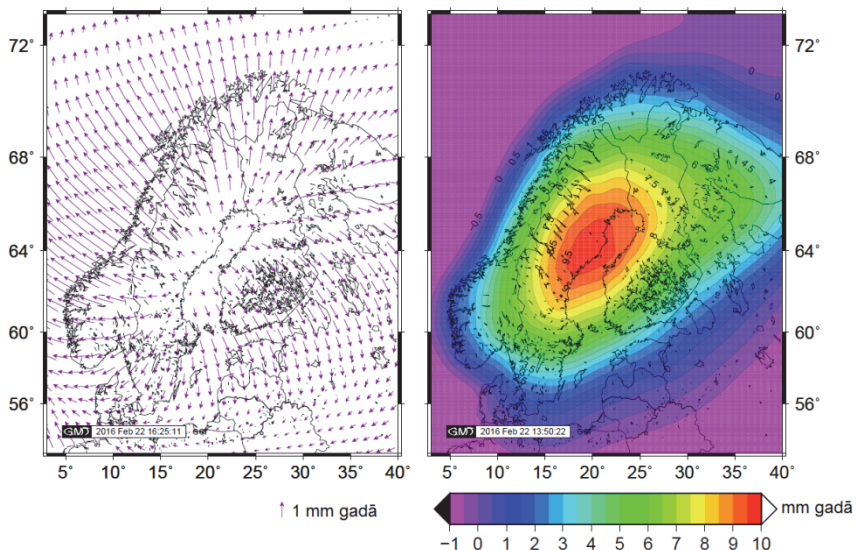
Zemes virskārtas pacelšanās ir tikai viens no procesiem, kas saistīts ar glaciālo izostatisko noregulēšanos (*GIA*), kas ir cietās Zemes reakcija uz ledāju masu izmaiņām. *GIA* pētījums ir daudzdisciplinārs. *GIA* efekts izsauc gravitācijas lauka izmaiņas, Zemes rotācijas un garozas spriegumu izmaiņas, kas savukārt var ietekmēt jūras līmeni (*Poutanen, Steffen, 2014*). 1.3. attēls parāda iesaistīto efektu mijiedarbību.

Zemes virskārtas pacelšanās ir visievērojamākais ģeodinamiskais process Fennoskandijā. Zemes pacelšanās maksimumu var novērot netālu no pilsētas *Umeå* (*Steffen, Wu, 2011*), kur esošā absolūtā pacelšanās ir ap 10 mm gadā, un pēdējā gadsimta laikā pacelšanās ātrums attiecībā pret jūras līmeni sasniedza gandrīz 9 mm gadā (*Poutanen, Steffen, 2014*).

Pēdējais Ziemeļu pacelšanās modelis *NKG2005LU* (*Vestøl, 2006; Ågren, Svensson, 2007*) balstās uz nivelēšanas datiem, mareogrāfu datiem un ģeofizikālo modelēšanu. Tas bija ierosināts un aprēķināts Ziemeļvalstu ģeodēziskās komisijas (*NKG*) darba grupā ar mērķi noteikt augstumus (*Nordman et al., 2014*). *NKG_RF03vel* deformācijas modeļa (skat. 1.4. attēlu) koordinātu ziemeļu un austrumu komponentes izrietošas no *GIA* modeļa, kas dots pēc *Milne et al. (2001)*. Šī modeļa ātrumu lauks bija transformēts uz GPS-atvasināto ātrumu lauku saskaņā ar *Lidberg (2004)*.



1.3. attēls. *GIA* efekts un relatīvā jūras līmeņa izmaiņas (*Steffen, 2015*).



1.4. attēls. Deformācijas modelis *NKG_RF03vel*: horizontālie ātrumi pēc *Lidberg (2004)* (kreisajā pusē) un vertikālie ātrumi no modeļa *NKG2005LU(ABS)* (labajā pusē).

Jaunākie Ziemeļu pacelšanās modeļi šobrīd tiek izstrādāti; tie balstīsies uz pēdējiem sasniegumiem novērojumu tehnoloģijās un modelēšanā (*Poutanen, Steffen, 2014*).

Okeānu plūdmaiņu efekts

Okeānu plūdmaiņas, līdzīgi cietās Zemes plūdmaiņām, tiek radītas gravitācijas spēku ietekmē, bet okeāna spēja sadalīt masu piešķir tām savu dinamiku. Okeānu plūdmaiņu raksturs krasta jebkurā vietā ir stingri atkarīgs no krasta līnijas formas un jūras dibena profila. Tādēļ okeānu plūdmaiņu spektrs ir tāds pats kā cietās Zemes plūdmaiņām, bet plūdmaiņu viļņu amplitūda un fāze ir atšķirīgas (*Doan, Brodsky, 2006*).

Okeānu plūdmaiņu modeļi ir nepieciešami, lai aprēķinātu spiediena ietekmi punktā. Daži modeļi balstās uz hidrodinamisko modelēšanu, citi – uz satelītu altimetrijas novērojumiem. Būtībā okeānu plūdmaiņu modeļi, kas bāzēti uz satelītu altimetriju, ir labāki atklātā okeāna reģionos, savukārt modeļi, kas iegūti no mareogrāfu datiem un hidrodinamiskās modelēšanas, ir labāki piekrastes zonās (*Khan, 2005*).

2. GNSS

GNSS ietver *ASV NAVSTAR* Globālo Pozicionēšanas Sistēmu (GPS), Krievijas GLOBālo Navigācijas Satelītu Sistēmu (*GLONASS*), nākotnē arī Eiropas sistēmu – *Galileo* u. c.

Ļoti augstas precizitātes potenciāls kopā ar iekārtas salīdzinoši vieglu transportējamību padara GNSS par piemērotu tehnoloģiju Zemes garozas mūsdienu kustību noteikšanai. Pateicoties pilnīgi automātiskiem zema enerģijas patēriņa GNSS uztvērējiem un iespējai raidīt datus garos attālumos, nepārtraukti novērojumi pastāvīgās vietnēs tiek lietoti aizvien vairāk (Seeber, 2003).

Šajā nodaļā sniegts apskats par GNSS pozicionēšanas pamatprincipiem un priekšstats par korekciju koncepciju.

Ievads

Satelītu ģeodēzijas pamatvienādojums tiek formulēts šādi:

$$\mathbf{r}_S(t) = \mathbf{r}_B(t) + \boldsymbol{\rho}(t), \quad (2.1.)$$

kur $\mathbf{r}_S(t)$ raksturo satelīta pozīciju, $\mathbf{r}_B(t)$ – novērojumu stacijas pozīciju, un $\boldsymbol{\rho}(t)$ – sakarību starp novērojumiem. Ar mērķi stabilizēt un vienkāršot risinājumu aprēķinu procesā tiek uzskatīts, ka visi parametri ir nezināmi vai arī daži no tiem ir zināmi.

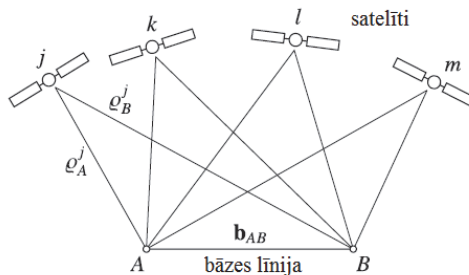
Satelīta pozīcija un novērojumu punkts ir laika funkcijas, citiem vārdiem, vienādojums (2.1.) ietver laika atkarīgus efektus, ko iedala trijās galvenās grupās.

Pirmā grupa ietver Zemes rotāciju, polāro kustību, cietās Zemes plūdmaiņas, okeānu plūdmaiņu spiedienu u. c. Otrā grupa apskata satelītu orbītu kustības. Trešā grupa ietver pulksteņu parametrus un efektus, kas aiztur signāla izplatīšanos no satelīta līdz GNSS uztvērējam; tie ir troposfēras un jonosfēras ietekmes efekti.

Laikā atrisinātu parametru aprēķinu vispārīgo un globālo problēmu, ir nepieciešami liela daudzuma satelītu novērojumi no vairākām globāli izvietotām stacijām (Seeber, 2003).

Relatīvā pozicionēšana

Relatīvās pozicionēšanas mērķis ir noteikt nezināmā punkta koordinātas attiecībā pret zināmo punktu, kas parasti ir stacionārs, t. i., relatīvā pozicionēšana tiek fokusēta uz vektora noteikšanu starp diviem punktiem; to parasti sauc par bāzes vektoru vai bāzes līniju (skat. 2.1. attēlu).



2.1. attēls. Relatīvās pozicionēšanas pamatprincips (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Relatīvā pozicionēšana prasa vienlaicīgus novērojumus atbalsta punktā un nezināmā punktā. Pateicoties šiem vienlaicīgiem novērojumiem, var būt izveidotas lineārās sakarības, kas dod “vienkāršas starpības”, “divkāršas starpības” un “trīskāršas starpības” (*Hofmann-Wellenhof et al.* 2008).

“Vienkāršas starpības” iegūst no diviem uztvērējiem vai diviem satelītiem. “Divkāršas starpības” iegūst starp diviem uztvērējiem un diviem satelītiem. Tas ļauj izslēgt uztvērēja un satelītu pulksteņu kļūdas. Turklāt “trīskāršas starpības”, kas ir “divkāršu starpību” starpības divās dažādās epohās, izveido, lai izslēgtu fāžu nenoteiktības doto intervālu robežās (*Khan*, 2005).

“Divkāršu starpību” metode tiek plaši izmantota. Aprēķinu procesā tiek izveidots tīkls, kas ietver atbalsta (drošas) stacijas un stacijas ar nezināmām koordinātām. Tīkla priekšrocība ir tāda, ka praktiski visas tīklam raksturīgās kļūdas izslēdz viena otru daļēji vai pilnībā; šīs kļūdas ietver troposfēras un jonosfēras ietekmi, kā arī plūdmaiņu un bezplūdmaiņu spiedienu (*Nordman*, 2010).

3. ZEMES VIRSMAS KUSTĪBAS LATVIJAS GNSS STACIJĀS

Pielietojot GNSS, Zemes virsmas vertikālie un horizontālie pārvietojumi var tikt uzmērīti ar ļoti augstu precizitāti.

Šajā pētījumā ir apskatīti Zemes virsmas lokālie pārvietojumi, kas ir iegūti no Latvijas GNSS staciju pozīciju laika sērijām. Tā kā Latvija atrodas reģionā, kas pakļauts Zemes relaksācijas efektam, notiekošajam ledāja masas izzušanas dēļ, ir iegūti rezultāti salīdzināšanai ar deformācijas modeļa *NKG_RF03vel* datiem (*Haritonova et al.*, 2015a).

Dalība *EUPOS*[®] *ECC*

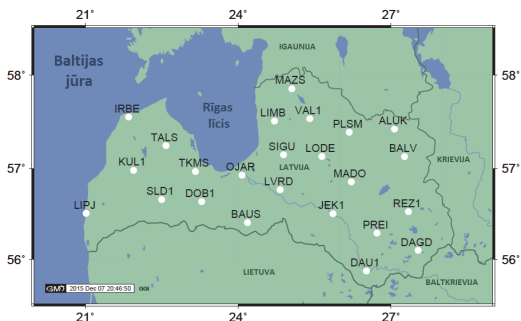
EUPOS[®] iniciatīva pārstāv starptautisko ekspertu grupu, kas ietver sabiedriskās organizācijas no tādām nozarēm, kā ģeodēzija, ģeodēziskā uzmērīšana un kadastrs. Partneri no Centrālās un Austrumeiropas strādā pie vienotas telpiskās atbalsta infrastruktūras nodrošināšanas, izmantojot Diferenciālās GNSS *EUPOS*[®] atbalsta staciju servisu (*Rosenthal*, 2008).

Ar mērķi vairāk stiprināt nacionālās *EUPOS*[®]/*ETRS89* realizācijas un nodrošināt nacionālo *EUPOS*[®] servisu homogenitāti, tika nodibināts *EUPOS*[®] kombinēšanas centrs (*ECC*). Tā galvenais uzdevums ir kombinēt iknedēļas *EUPOS*[®] *SINEX* nacionālos risinājums vienotā iknedēļas *EUPOS*[®] risinājumā. *EUPOS*[®] kombinēto risinājumu var uzskatīt par *ETRS89* aktuālās realizācijas turpmāko sabiezināšanu.

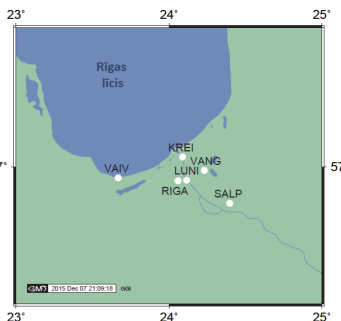
Latvijas Universitātes Ģeodēzijas un ģeoinformātikas institūts (LU ĢĢI) regulāri rēķina un nodod Latvijas *SINEX* risinājumus *EUPOS*[®] kombinēšanas centram.

Latvijas GNSS tīkli

Saistībā ar *EUPOS*[®] reģionālās attīstības projektu Latvijā tika izveidoti divi pastāvīgās darbības GNSS staciju tīkli – *LatPos* (Zvirgzds, 2007; Zvirgzds, 2012) un *EUPOS*[®]-*Riga* (*Abele et al.*, 2008), kas strādā, sākot no 2006. gada.



3.1. attēls. Aktuālais *LatPos* tīkls ar 24 nepārtrauktas darbības GPS/GNSS stacijām.



3.2. attēls. *EUPOS*[®]-*Riga* un *IGS/EPN* stacija *RIGA*.

Patlaban *LatPos* tīkls ietver 24 pastāvīgās darbības stacijas, kā parādīts 3.1. attēlā. *EUPOS*[®]-*Riga* tīklā ir piecas stacijas (skat. 3.2. attēlu), kas atrodas Rīgā un tās apkārtnē. Ir parādīts arī stacijas *RIGA* izvietojums – tā ir *IGS* un *EPN* tīklu stacija.

Tīkla risinājums un datu apstrāde

EUPOS[®]-*Riga* un *LatPos* tīklu GNSS staciju pozīciju laika sērijas tika aprēķinātas, lietojot *Bernese* programmatūru, izstrādātu Bernes Universitātē Šveicē. Staciju diennakts koordinātas tika iegūtas septiņu gadu novērojumu periodam, t. i., no 2008. līdz 2014. gadam, lietojot *Bernese* GPS programmatūras versiju 5.0 (*Beutler et al., 2007*). Sākot no 2015. gada, datu aprēķiniem tika izmantota *Bernese* GNSS programmatūras versija 5.2 (*Dach et al., 2015*).

3.1. tabula

GNSS datu apstrādes gaitas shēma

Soļi	Institūcija	Papildu apraksts	<i>ECC</i> kumulatīvais iknedēļas risinājums (2008.–2014.)	ĢĢI ikdienas risinājums (2012.–2015.)
Datu apstrāde	ĢĢI	Programmatūra	<i>Bernese</i> GPS program. versija 5.0	<i>Bernese</i> GNSS program. versija 5.2
		Datu kopas	<i>IGS</i> un <i>CODE</i> datubāzes	<i>CODE</i> datubāze
		Novērojumi (<i>RINEX</i> faili)	GPS	GPS un <i>GLONASS</i> (no 2015. gada 1. dienas)
		Atbalsta stacijas	5–7 <i>EPN</i> (A un B klases)/ <i>IGS</i> stacijas	9 <i>EPN</i> (A klases)/ <i>IGS</i> stacijas
Staciju koordinātas un transformācijas	<i>ECC</i> / ĢĢI	–	Ikdienas risinājumi sistēmā <i>IGS05/08</i> : kombinēti iknedēļas <i>SINEX</i> risinājumos	Ikdienas risinājumi sistēmā <i>IGb08</i> : viena soļa transformācija no <i>ITRF2008</i> uz

			un nodoti <i>ECC</i> centram turpmākajai kombinēšanai vienā iknedēļas <i>EUPOS</i> [®] risinājumā	<i>ETRF2000</i> izmantojot 14 transf. parametrus pēc <i>Boucher, Altamimi (2011)</i>
Laika sēriju analīze un izmaiņu tendences (“trends”) iegūšana	<i>ECC/</i> <i>ĢĢI</i>	–	–	Nobīžu korekcija, ekstrēmu izslēgšana
Staciju ātrumi un vid.kv.kļ.	<i>ECC/</i> <i>ĢĢI</i>	–	Horizontālie ātrumi doti <i>ETRF2000</i> sistēmā, un vertikālās komponentes ātrumi – <i>ITRF2008</i> sistēmā	

Lai nodrošinātu datu kontroli un homogenitāti, promocijas darbā bija izlemts pārrēķināt abu tīklu GNSS staciju pozīcijas periodam no 2012. līdz 2014. gadam, izmantojot programmatūras pēdējo versiju un tādā veidā iegūstot laika sērijas četrus gadu novērojumu periodam (2012.–2015.) ar *Bernese* programmatūras versiju 5.2.

GNSS datu apstrādei tika izmantoti *CODE* (agrāk *IGS*) precīzo orbītu, Zemes orientācijas un pulksteņu korekciju produkti ar *CODE* jonosfēras gala produktu. Tika lietota “sausā” globālās attēlošanas funkcija (*DRY_GMF*) kā izejas troposfēras modelis; tika izvēlēts 3° pacēluma leņķis. Visu staciju pozīcijām tika piemērotas cietās Zemes plūdmaiņu (*Petit, Luzum, 2010*) un okeānu plūdmaiņu spiediena korekcijas (tika izvēlēts okeānu plūdmaiņu modelis *FES2004*).

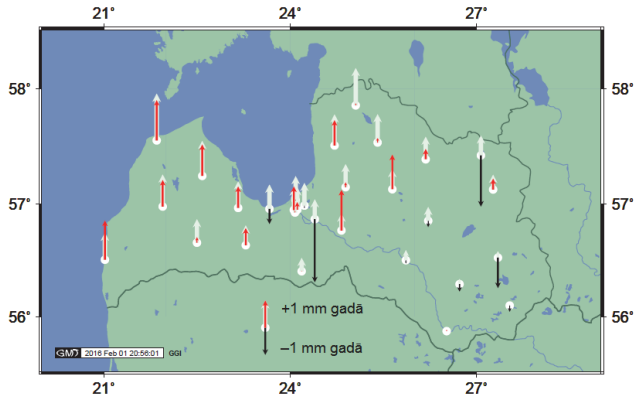
Aprēķini tika veikti, lietojot Diferenciālās GNSS (relatīvās) apstrādes metodi.

3.1. tabula apkopo visus nepieciešamos soļus, lai no GNSS novērojumiem iegūtu staciju koordinātu izmaiņu ātrumus un koordinātu vidējās kvadrātiskās kļūdas abiem risinājumiem (*Haritonova et al., 2016*).

Rezultāti un analīze

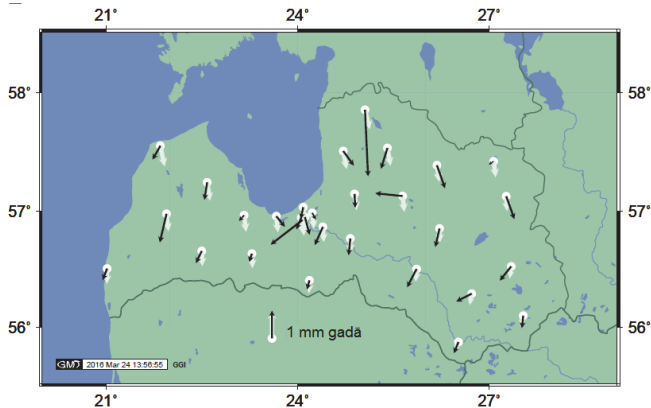
Ātrumu komponentes no *ECC* kumulatīvā risinājuma ar minimāliem ierobežojumiem parādītas 3.3. un 3.4. attēlos. 3.3. attēls atspoguļo staciju vertikālās kustības, 3.4. attēls parāda horizontālās kustības. Papildus ar gaišiem vektoriem ir parādīti deformācijas modeļa *NKG_RF03vel* ātrumi.

Pēc ekstrēmu izslēgšanas *ECC* kumulatīvā iknedēļas risinājuma vertikālo ātrumu rezultējošais diapazons ir 2,05 mm gadā; t. i., no –0,56 mm līdz +1,49 mm gadā. Saskaņā ar modeli *NKG_RF03vel* Latvijas GNSS staciju vertikālie ātrumi ir ar pozitīvu zīmi; ātrumu diapazons sasniedz 1,68 mm gadā ar minimumu +0,04 mm gadā un maksimumu +1,72 mm gadā.



3.3. attēls. Latvijas GNSS staciju kumulatīvie vertikālie ātrumi no *EUPOS*[®] novērojumu kopas un vertikālie ātrumi pēc modeļa *NKG_RF03vel*.

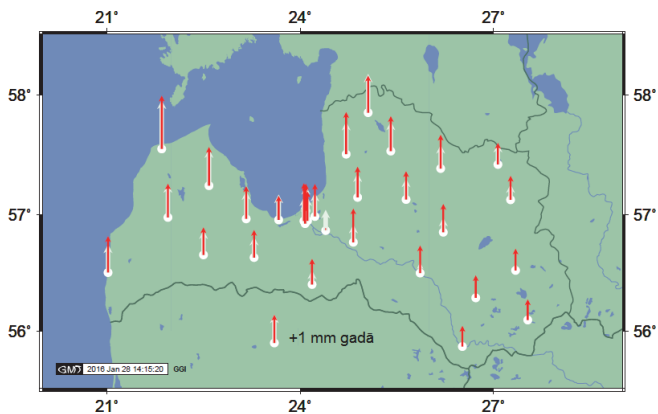
Kas attiecas uz horizontālajiem pārvietojumiem, ātrumu lauks arī nav homogēns, dažu staciju gadījumā uzrādot ekstrēmumus. Tomēr staciju ātrumi pārsvarā ir vērsti uz dienvidiem un nepārsniedz 1 mm gadā. Šajā gadījumā var novērot salīdzinoši labu atbilstību deformācijas modeļa *NKG_RF03vel* ātrumu laukam.



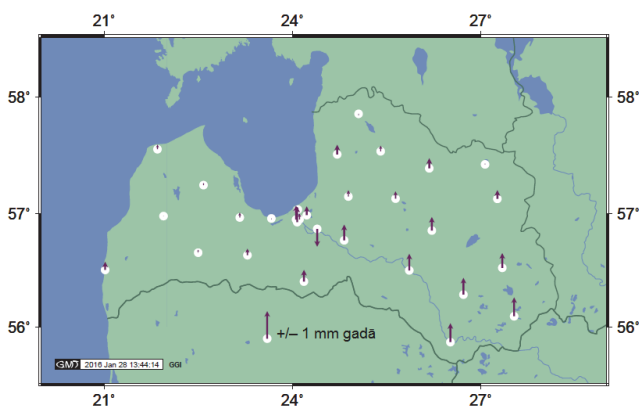
3.4. attēls. Latvijas GNSS staciju kumulatīvie horizontālie ātrumi no *EUPOS*[®] novērojumu kopas un horizontālie ātrumi pēc modeļa *NKG_RF03vel*.

Staciju vertikālie ātrumi, kas iegūti ikdienas risinājumā, parādīti 3.5. attēlā. Tādā pašā veidā, kā iepriekš, ir doti arī vertikālie pārvietojumi no modeļa *NKG_RF03vel*. Starpības starp abām datu kopām parādītas 3.6. attēlā.

Kā var redzēt, vertikālie ātrumi ir ar pozitīvu zīmi, un tikai vienas stacijas (*SALP*) gadījumā var novērot ekstrēmālu ātrumu. Pēc tā izslēgšanas vertikālo ātrumu rezultējošais diapazons sasniedz 1,16 mm gadā, kas ir mazāks, salīdzinot ar *ECC* kumulatīvā iknedēļas risinājuma diapazonu un pārvietojumu diapazonu pēc *NKG_RF03vel* modeļa.

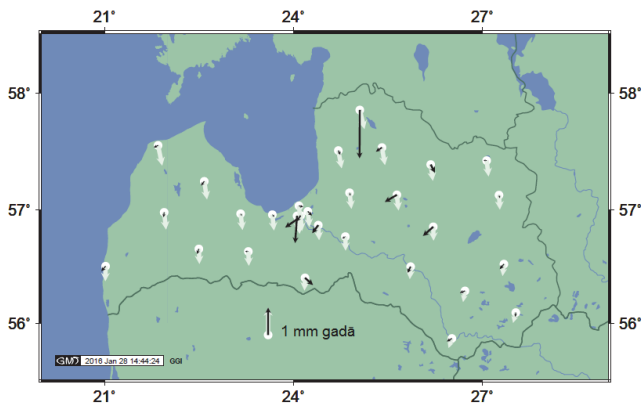


3.5. attēls. Latvijas GNSS staciju vertikālie ātrumi, kas iegūti ikdienas risinājumā (2012.–2015.), un vertikālie ātrumi pēc modeļa *NKG_RF03vel*.



3.6. attēls. Starpības starp vertikālajiem ātrumiem no ikdienas risinājuma (2012.–2015.) un no modeļa *NKG_RF03vel*.

3.6. attēlā var redzēt, ka GNSS rietumu staciju pārvietojumi atbilst *NKG_RF03vel* modeļa datiem. Vertikālās komponentes ātrumu vislielākās starpības starp iegūtajiem rezultātiem un modeļa vērtībām ir vairāk izteiktas to staciju gadījumā, kas atrodas Latvijas dienvidaustrumu daļā, kaut arī šī neatbilstība nepārsniedz 1 mm gadā.



3.7. attēls. Latvijas GNSS staciju horizontālie ātrumi, kas iegūti ikdienas risinājumā (2012.–2015.), un horizontālie ātrumi pēc modeļa *NKG_RF03vel*.

Staciju horizontālie ātrumi, kas iegūti ikdienas risinājumā, parādīti 3.7. attēlā. Staciju vairākumam ātrumu vērtība sasniedz milimetra dažas desmitdaļas. Salīdzinot ar horizontāliem pārvietojumiem no *EUPOS*[®] novērojumu kopas, šie ātrumi ir mazāk izteikti. Tomēr var redzēt, ka to virzieni pārsvarā atbilst *NKG_RF03vel* modeļa horizontālo ātrumu orientācijai.

4. JŪRAS LĪMEŅA SVĀRSTĪBAS LATVIJAS PIEKRASTES HIDROLOĢISKAJĀS STACIJĀS

Tāds ģeodinamiskais efekts, kā okeānu plūdmaiņu spiediens, parasti tiek izslēgts no GNSS mērījumiem saskaņā ar *IERS* Konvenciju rekomendācijām. Bet pastāv vēl okeānu spiediena bezplūdmaiņu svārstību efekts, kuram ir sava ietekme uz ģeodēziskajiem novērojumiem. Baltijas jūrai ir raksturīgas vairākas ievērojamas parādības. Viena no tām ir jūras līmeņa svārstības vēju ietekmē, kas iespaidojas no līču un salu sarežģītām formām. Šo faktoru ietekmē jūras līmeņa svārstību diapazons var sasniegt 3 m līču krastos. Savukārt Baltijas jūras plūdmaiņu svārstības atrodas tikai dažu centimetru diapazonā.

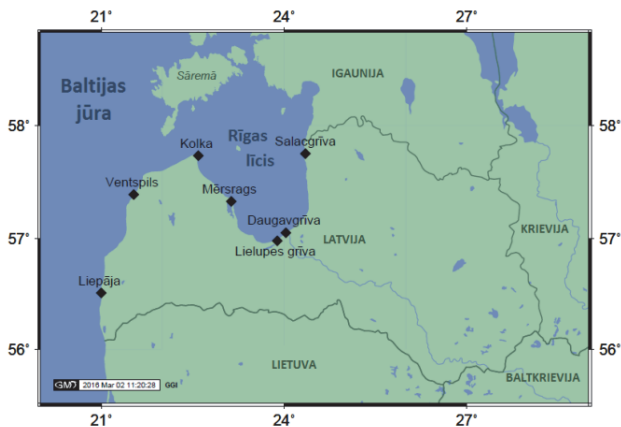
Šajā nodaļā sniegts Baltijas jūras ūdens līmeņa svārstību Latvijas piekrastē raksturojums, kas ir potenciāli pietiekams, lai rosinātu turpmāko izpēti par Baltijas jūras spiediena ietekmi uz GNSS koordinātu laika sērijām.

Datu izvēle un apstrāde

Šā pētījuma ietvaros tika izmantoti novērojumi no septiņām piekrastes hidroloģiskajām stacijām. Izvēlēto staciju izvietojums ir parādīts 4.1. attēlā.

Jūras līmeņa dati ir stundas pēdējo 15 minūšu vidējās vērtības, tādā veidā katrai dienai iegūstot 24 vērtības. Katras stacijas laika sērijās trīs gadu periodā (2013.–2015.) bija īsi pārrāvumi, biežāk 1–3 stundas gari. Lai varētu veikt spektrālo analīzi, dati tika interpolēti. Garu pārrāvumu gadījumā netika izmantoti visa gada dati.

Spektrālās analīzes veikšanai tika lietota Furjē transformācija ar Parzena logu. Jūras līmeņa laika sērijas tika atbrīvotas no “trends” (izmaiņu tendences), atdalot neharmonisko ietekmi (Haritonova, 2016).

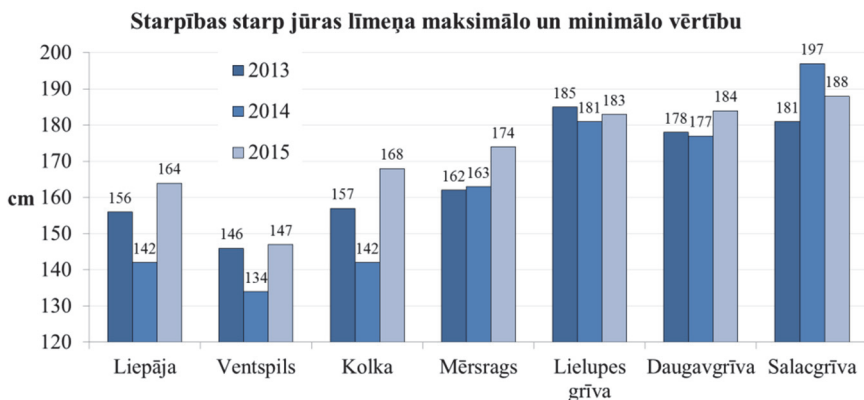


4.1. attēls. Latvijas hidroloģiskās stacijas: Liepāja, Ventspils, Kolka, Mērsrags, Lielupes grīva, Daugavgrīva un Salacgrīva.

Rezultāti un analīze

4.2. attēls atspoguļo jūras līmeņa dinamiku Latvijas krastā – tajā ir dotas starpības starp jūras līmeņa maksimālo un minimālo vērtību attiecīgajā stacijā.

Var novērot, ka jūras līmeņa starpības palielinās ar katru nākamo staciju. Stacijām Liepāja, Ventspils un Kolka ir vismazākās jūras līmeņa starpības, salīdzinot ar pārējām stacijām, visu trīs gadu gadījumos. To var izskaidrot ar to faktu, ka stacijas atrodas atklātās jūras tuvumā un vistuvāk jūras līmeņa svārstību mezgla līnijai (*Ekman*, 2009); kur īstermiņa svārstības pārsvarā tiek izslēgtas, un ilgtermiņa jūras līmeņa svārstībām var novērot vidējās amplitūdas.



4.2. attēls. Starpības starp jūras līmeņa maksimālo un minimālo vērtību Latvijas septiņās piekrastes hidroloģiskajās stacijās trīs gadu gadījumam.

Turklāt starpības starp jūras līmeņa maksimumu un minimumu stacijās Liepāja, Ventspils un Kolka ir krasi izteiktas ikgadējās izmaiņas, salīdzinot ar pārējo staciju datiem. Skaidrojums varētu būt Baltijas jūras ikgadējos meteoroloģiskajos apstākļos, kuru izmaiņas ir vairāk novērojamas atklātā jūrā.

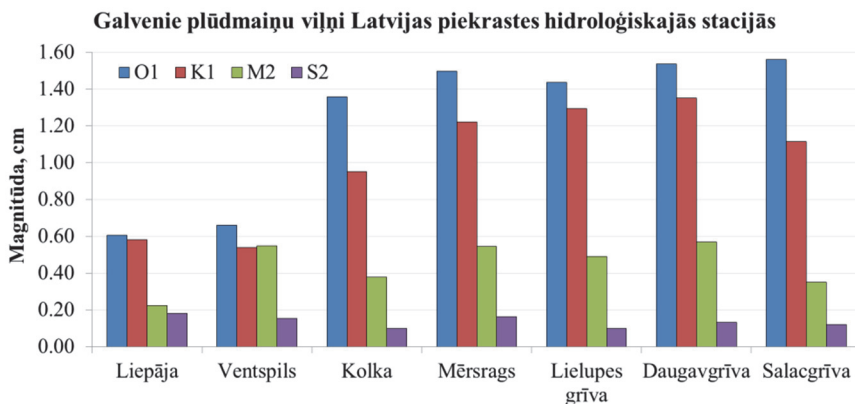
Pēc *Wübbler, Krauss (1979)* Rīgas līcim ir ievērojama nozīme Baltijas jūras seišās. Jūras līmeņa svārstības līču iekšējās teritorijās uzvedās kā stāvošie viļņi; tas attiecas arī uz Rīgas līci. Tas izpaužas augstu amplitūdu veidā, un var būt izsaukts šī baseina ko-oscilējošā efekta dēļ.

Piekrastes stacijas Lielupes grīva, Daugavgrīva un Salacgrīva atrodas Rīgas līča austrumu daļā. Jūras līmeņa starpības, kas raksturīgas šīm stacijām, uzrāda visaugstākās vērtības, kas pilnībā atbilst iepriekšējam apgalvojumam.

Spektrālās analīzes rezultāti ir parādīti 4.3. attēlā; tas atspoguļo plūdmaiņu viļņu vidējās magnitūdas, kas iegūtas no trīs gadu vērtībām. Kopumā tika identificēti četri galvenie plūdmaiņu viļņi (O_1 , K_1 , M_2 , S_2) jūras līmeņa izmaiņu spektrā.

Var novērot, ka iegūtās plūdmaiņu viļņu magnitūdas Rīgas līcī (Kolka, Mērsrags, Lielupes grīva, Daugavgrīva, Salacgrīva) ir lielākas nekā Latvijas rietumu krastā (Liepāja un Ventspils). Efekta skaidrojums ir šāds: jūras līmeņa izmaiņas Baltijas jūras krastā ir vairāk iespaidotas no meteoroloģiskās ietekmes nekā Rīgas līča krastā; šīs ietekmes izsauktais spektrālais troksnis neļauj identificēt plūdmaiņu svārstību īstās magnitūdas.

Diennakts viļņa O_1 magnitūda ir vislielākā visās stacijās. Tuvu tai atrodas diennakts viļņa K_1 magnitūda, izņemot divas stacijas Salacgrīva un Kolka, kas ir Rīgas līča ziemeļu stacijas. Svarīgi atzīmēt, ka diennakts viļņa K_1 magnitūda ir praktiski vienāda ar pus-diennakts viļņa M_2 magnitūdu Ventspils stacijā. Salīdzinot pus-diennakts viļņus, M_2 magnitūda ir 3–5 reizes lielāka nekā S_2 magnitūda, bet nevis Liepājas stacijā, kur šīs magnitūdas ir praktiski vienādas.



4.3. attēls. Galveno plūdmaiņu viļņu magnitūdas Latvijas piekrastes hidroloģiskajās stacijās.

Papildu spektrālā blīvuma funkcijas uzrādīja izteiktu jaudu frekvencē – pieci cikli dienā. Šī frekvence neatbilst plūdmaiņu frekvencei. Svārstību magnitūda nav ievērojama; tā ir tuvu 1 mm. Tomēr jāatzīmē, ka šī frekvence ir raksturīga tikai Mērsraga, Lielupes grīvas un Daugavgrīvas stacijai. Šīs stacijas atrodas salīdzinoši tuvu viena otrai Rīgas līcī, tāpēc blīvuma jauda varētu atspoguļot kādu lokālu efektu.

5. JAUNAS MULTIFUNKCIONĀLĀS OPTISKĀS NOVĒROŠANAS SISTĒMAS PROJEKTĒŠANA

Šajā nodaļā ir aprakstīti unificētas satelītu lāzera tālmēra konstrukcijas izstrādes galvenie rezultāti.

Kā pārbaudītā ģeodēzijas tehnoloģija Satelītu lāzerlokācija (*SLR*) sniedz ievērojamu potenciālu zinātniskiem pētījumiem par cieta Zemi, tās okeānu un atmosfēras sistēmām. *SLR* ļauj visprecīzāk noteikt Zemes satelītu ģeocentriskās pozīcijas, tāpēc nodrošina stabilu atbalsta sistēmu pēcglaciālās noregulēšanās, jūras līmeņa un ledus apjoma izmaiņu monitoringam.

Šīs nodaļas mērķis ir sniegt novērojumu metožu aprakstu un izklāstu par jaunas multifunkcionālās optiskās novērošanas sistēmas dizainu, kas paredzēta Zemei tuvo objektu pozicionāliem un lāzertālmēra novērojumiem, kā arī apkopot astrometriskās apakšsistēmas funkcionālu testu galvenos rezultātus.

Metodes un to nozīmīgums

Virzienu no Zemes līdz satelītiem noteikšana, kas balstīta uz optiskajiem novērojumiem, ir viena no agrākajām satelītu ģeodēzijas metodēm, kas dod ievērojamus rezultātus. Turklāt satelītu optiskajai novērošanai ir būtiska nozīme, jo tā ir vienīgā satelītģeodēzijas tehnoloģija, kas sniedz tiešu piekļuvi inerciālajai atbalsta sistēmai.

20. gadsimta pēdējā desmitgadē pozicionēšanas elektronisko sensoru strauja attīstība, galvenokārt lādīnpārneses ierīču (*CCD*) attīstība, veicināja optisko metožu atdzimšanu astronomijā un arī satelītu ģeodēzijā.

Lāzera distances mērījumos līdz satelītiem tiek mērīts lāzera impulsa izplatīšanās laiks (kā tas veic distanci no Zemes stacijas līdz satelītam).

SLR pielietojumu jaunās sfēras ir attīstījušās kopā ar uzmērīšanas sistēmu pieaugošu precizitāti. Ar precizitātes diapazonu ± 1 cm vai labāk ievērojami uzlabojumi var būt paveikti atbalsta sistēmu izveidošanā, ģeodinamikā, satelītu precīzo orbītu noteikšanā un Zemes gravitācijas lauka modelēšanā (*Seeber, 2003*).

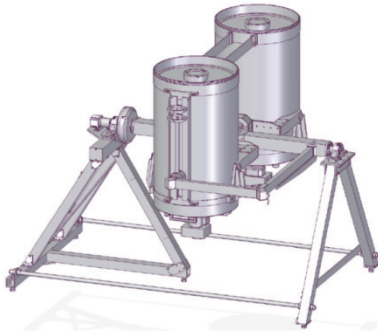
Jauna instrumenta projektēšana

Instrumenta konstrukcijas projektēšana ir pabeigta – visas galvenās komponentes bija izgatavotas vai pasūtītas un tika saliktas kopā (skat. 5.1. un 5.2. attēlu) (*Balodis et al., 2016*).

Aktīvā režīmā novērojumi, ieskaitot novērošanu dienas stundās, prasa ļoti precīzu tēmēšanu, tādēļ tika uzprojektēta oriģinālā optiskā shēma ar trim optiskajiem kanāliem, t. i., vienu raidītāju un diviem uztvērējiem. Viena no divām optiskajām sistēmām ir aprīkota ar *CCD* un tiek izmantota astrometriskiem mērķiem, ieskaitot montāžas uzvadīšanas virziena noteikšanu, objektu koordinātu noteikšanu un kustības ģidēšanu. Cita, kas aprīkota ar atstarotās gaismas impulsa detektoru, tiks lietota *SLR* impulsa apstrādei (*Kaminskis et al., 2015; Haritonova et al., 2016*).

Sistēmas galvenie tehniskie parametri ir (*Zarins et al., 2015*):

- a) divas 41 cm diametra optiskās sistēmas *Alt-Alt* montāžā, atsevišķs raidītā stāra kolimators;
- b) orbitālā objekta uzvadīšanai un sekošanai paredzētie motori un kontroles sensori ar pozicionēšanas precizitāti dažu loka sekunžu robežās;
- c) pozicionēšanas novērojumu precizitāte loka sekundes daļas robežās objektiem ar optisko magnitūdu līdz 15m;
- d) *SLR* funkcionalitāte (atkarībā no lāzera raidītāja parametriem) līdz ģeostacionārajai orbītai;
- e) iespēja vienlaikus veikt leņķiskos un *SLR* novērojumus – abu optisko sistēmu izmantošana dažādās kombinācijās.



5.1. attēls. Jaunas multifunkcionālās optiskās novērošanas sistēmas dizains.



5.2. attēls. Instrumenta uzstādīšana.

Lauka testi un montāžas kļūdu modelis

Lauka testu galvenais mērķis bija novērtēt darbības spējas un noteikt parametrus optimālai vizualizēšanai un datu apstrādei.

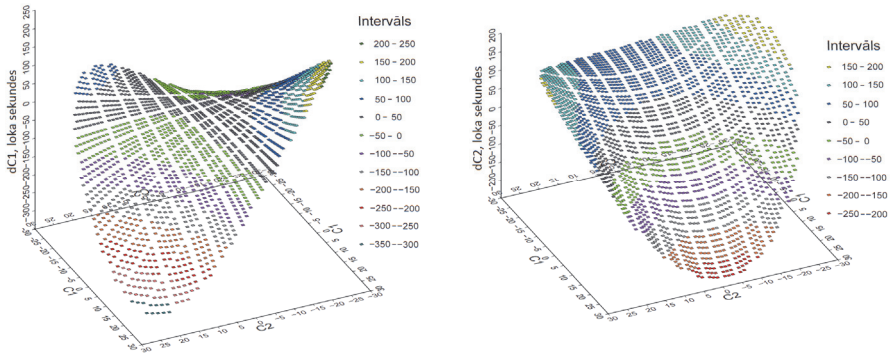
Kā sevišķi pieprasītā tehnoloģija *SLR* prasa augstu tehnisku precizitāti instrumenta pozicionēšanai. Reālā laika astrometriskās pozīcijas pieejamība var būt īpaši noderīga pozicionēšanas sistēmas testēšanai un kalibrēšanai.

Šī nodaļa sniedz funkcionālu testu rezultātus un apskata multifunkcionālās optiskās novērošanas sistēmas vadības programmatūras un aparatūras komponentu koreģēšanu (Zariņš *et al.*, 2016).

Viens no galvenajiem iekārtas konstruktīviem mērķiem ir lāzertālmēra funkcionalitātes nodrošinājums. Lai varētu veikt lāzera novērojumus automātiskajā (“aklā”) režīmā, tēmēšanas precizitātei jābūt labākai par izstarotā stara diverģenci. Tā kā stara diverģence tiek bieži lietota loka minūtes robežās, sekošanai tālu objektu locēšanai jānodrošina precizitāti loka minūtes daļās. Līdz ar to tēmēšanas precizitātei ideālā gadījumā jābūt dažu loka sekunžu robežās. Šādu precizitāti ir grūti nodrošināt jau no mehānikas viedokļa. Tāpēc montāžas kļūdu modelis, kas realizēts ar vadības programmatūru, var būt piemērots, lai ieviestu tēmēšanai nepieciešamās korekcijas.

Problēma ir atrast vienkāršu matemātisko modeli, kas varētu efektīvi aprakstīt montāžas faktiskās deformācijas un neprecizitātes. Tāpēc tika izmantoti aproksimācijas modeļi, kas bāzēti uz pozicionāliem mērījumiem.

5.3. attēlā ir dots montāžas kļūdu modeļa trīsdimensionālais atainojums. Nobīžu vērtības atspoguļo leņķu nolasīšanas sensora (enkodera) nulles punkta marķiera stāvokli attiecībā pret instrumenta koordinātu sistēmas nulles punktiem. Labākai pārskatāmībai shēmās tie nav parādīti. Modeļa shēmu asimetriskais raksturs, visticamāk, ir asu neortogonalitātes rezultāts, kas sasniedz 2–4 loka minūtes. Montāžas kļūdu ievērojama daļa rodas deformāciju dēļ, kuras pamatā ir radušās sakarā ar asu disbalansu.



5.3. attēls. Montāžas kļūdu modelis: primārās ass (C1) (kreisajā pusē) un sekundārās ass (C2) (labajā pusē) rotācijas korekcijas kā pozīcijas funkcijas.

Aprēķinātā kļūdu modeļa pielietojums nodrošina pozicionēšanas rezultējošo precizitāti kopumā 10"–20" robežās, kas jau varētu būt pietiekama "aklā" režīma zemo orbītu satelītu novērojumiem. Paredzēts, ka montāžas mehānikas turpmākā iestādīšana un montāžas kļūdu modeļa struktūras uzlabojumi uzlabos pozicionēšanas precizitāti līdz 5"–10" vai labāk.

Satelītu lāzera tālmēra konstrukcijas astrometriskās apakšsistēmas lauka testi apliecināja iekārtas vizualizēšanas un pozicionēšanas veiktspēju saskaņā ar projektētajām izstrādes iespējām. Montāžas kļūdu modeļa parametri tika aprēķināti, nodrošinot tādu pozicionēšanas rezultējošo precizitāti, kas praktiski piemērota *SLR* vajadzībām.

GALVENIE SECINĀJUMI

- 1) Apkopotie dati par Latvijas GNSS staciju horizontālo un vertikālo ātrumu laukiem, kā arī to pozīciju laika sērijām no izveidotā kataloga (skat. pielikumu B), parādīja ka:
 - a) iegūtie ātrumi liecina par Fennoskandijas pacelšanās efektu Latvijas teritorijā, jo gan iknedēļas risinājumā (2008.–2014.), gan ikdienas risinājumā (2012.–2015.) *EUPOS[®]-Rīga* un *LatPos* staciju vertikālo ātrumu vektoriem ir maksimālās vērtības Latvijas rietumu daļā un minimālās vērtības – Latvijas austrumu daļā; maksimālie šo vērtību diapazoni nepārsniedz 2 mm gadā;
 - b) vertikālo ātrumu lauks no ikdienas risinājuma ir vairāk homogēns, salīdzinot ar iknedēļas risinājumu, bet uzrāda neatbilstību deformācijas modelim *NKG_RF03vel* Latvijas dienvidaustrumu daļā, tomēr šī neatbilstība nepārsniedz 1 mm gadā;
 - c) horizontālo ātrumu vektoriem ir līdzīga orientācija abos risinājumos; vektori pārsvarā ir vērsti uz dienvidiem – saskaņā ar deformācijas modeli *NKG_RF03vel*, bet to vērtības ir atšķirīgas;
 - d) dažu GNSS staciju gadījumā var novērot ikgadējās koordinātu izmaiņas; vizisiteiktākās – stacijām *PREI*, *REZI*, *SALP* un *SLDI*; šo efektu var izskaidrot ar būves deformācijām, kur ir uzstādīta GNSS antena, vai grunts deformācijām.
- 2) Dotais jūras līmeņa svārstību Latvijas piekrastē raksturojums papildina iepriekš iegūtos rezultātus par Baltijas jūras dinamiku šajā reģionā un:
 - a) liecina par to, ka jūras līmeņa svārstību diapazons Rīgas līcī ir salīdzinoši augsts – viena gada laikā Salacgrīvas stacijā tas sasniedz 2 m; Liepājas, Ventspils un Kolkas staciju gadījumā šis diapazons nav tik augsts, bet starpībās starp jūras līmeņa maksimumu un minimumu ir krasi izteiktas ikgadējās izmaiņas, salīdzinot ar pārējo staciju datiem;
 - b) apstiprina diennakts (O_1 , K_1) un pus-diennakts (M_2 , S_2) plūdmaiņu esamību gan Rīgas līcī, gan Baltijas jūrā Latvijas piekrastē;
 - c) Rīgas līča staciju gadījumā atklāj frekvenci – pieci cikli dienā, kas neatbilst plūdmaiņu frekvencei un var liecināt par līcim raksturīgu lokālu efektu.
- 3) Uzprojektētās jaunas oriģinālas un universālas satelītu lāzera tālmēra iekārtas lauka testi parādīja, ka pozicionēšanas rezultējošā precizitāte praktiski piemērota *SLR* vajadzībām, un tai pašā laikā pastāv potenciālās iespējas uzlabot to, lietojot korekcijas mehāniskajiem parametriem un kļūdu modeļa struktūrai. Iekārta sniedz efektīvu un inovatīvu pieeju ģeodinamisko datu iegūšanā un var veicināt ģeodinamiskos pētījumus ne tikai Latvijā.

GENERAL REVIEW OF THE DOCTORAL THESIS

Subject topicality and formulation of the problem

Geodesy, with its main task to measure the planet Earth, has experienced remarkable development over the past 60 years since 1957, when the first artificial Earth satellite was launched into the orbit. Thereafter, thousands of satellites of various shapes, weights and payloads have been launched into various orbits to accomplish different exploratory missions.

The NAVSTAR (Navigation System by Timing and Ranging) first Global Positioning System (GPS) satellite was launched in 1978. Based on the development of GPS satellite observations, a new international organization – International GPS Service – was established in 1991 for the purpose of collecting the GPS observation results from all around the world; currently – International GNSS Service (IGS) based on the multiple Global Navigation Satellite Systems. The International Laser Ranging Service (ILRS) and International Very Long Baseline Interferometry Service (IVS) were established as well.

On the basis of this international scientific cooperation, the International Terrestrial Reference Frame (ITRF) has been created, and now it is becoming the object of continuous monitoring. At present, the detailed studies of the territory of each country have become available by way of collecting and analysing the time series of continuous satellite observation data.

Nowadays, the satellite orbit measurement back coupling with the site position observations provides an excellent way to determine coordinates with millimetre accuracy. This allows discovering the shape of the Earth in details and to gather data required for the studies of its interior structure. Besides, repeatedly performed geodetic observations enable to detect significant changes occurring on the Earth, such as movements of continents, horizontal and vertical displacements of the Earth's surface, coastline displacements of the oceans and seas, as well as to identify other geodynamic processes.

The application of space geodetic techniques in the field of sciences dealing with the planet Earth furthers more and more practical benefits for people around the world. One of these benefits is the possibility of establishing a unified terrestrial reference frame. As the Earth's surface is divided into tectonic plates and is affected by the internal forces occurring therein, the coordinate frame undergoes a change. The most difficult task is to define changes in the height component of coordinates. This is mostly due to fact that the Earth's surface dynamics is closely associated with the gravitational attraction from the Sun, the Moon and other objects, global and local mass redistribution, and global and seasonal climate changes as well. Therefore, the determination of height component and representation of its variations attract the scientific interest today.

Objective of the Doctoral Thesis

The objective of the Thesis is to discover the geodynamic processes of the Earth's crust in the territory of Latvia, occurred due to Fennoscandian land uplift phenomenon at the coast of the Baltic Sea, by way of using the Latvian GNSS permanent station coordinate time series computed with reference to EUREF Permanent Network (EPN) and by obtaining the Earth's crust displacements, as well as to design an additional monitoring device for observations in relation to the International Laser Ranging Service (ILRS) network.

Tasks of the Thesis

To achieve the objective, the solution of the following tasks is proposed:

- 1) to compute EUPOS[®]-Riga and LatPos permanent station coordinates with reference to EUREF Permanent Network (EPN), considering different impact sources, and summarize the results for a whole observation period from 2008 to 2015, giving the station horizontal and vertical velocities;
- 2) to produce a catalogue containing information on EUPOS[®]-Riga and LatPos station location and their position time series;
- 3) to evaluate the correlation of the Latvian GNSS station displacements to the data of deformation model NKG_RF03vel;
- 4) to characterize the water level variations of the Baltic Sea at the Latvian coast on the basis of the sea level station observation data and by employing spectral analysis;
- 5) to design the experimental instrument of a new original multi-purpose optical tracking system intended for both positional and laser ranging observations of near-Earth objects.

Scientific novelty of the Thesis

The scientific novelty of the present Doctoral Thesis is based on the following achievements:

- 1) the data on the Latvian GNSS station horizontal and vertical velocity fields has been formalized for the first time as a basis for the high-precision coordinate determination;
- 2) the catalogue containing information on EUPOS[®]-Riga and LatPos station location and their position time series has been prepared. In this context, the verification of GNSS station stability is given;
- 3) the correlation of the Latvian GNSS station displacements with the data of the deformation model NKG_RF03vel has been efficiently evaluated;
- 4) the description of the sea level variations at the Latvian coast has been given. It complements the earlier results concerning the dynamics of the Baltic Sea in this region, as it is based on the observations obtained along all Latvian coastal zone, as well as it is potential enough to facilitate further research on the influence of the Baltic Sea loading on GNSS coordinate time series;

- 5) the innovative and universal satellite laser ranging device with original optical scheme with three optical channels, i.e., one transmitter and two receivers, has been designed. The one of the twin optical systems is fitted with a CCD and used for astrometric purposes, but the other is fitted with a reflected light pulse detector and will be used for SLR pulse processing. The new satellite laser ranging device provides an efficient way to collect relevant geodynamic data for the vertical movement studies in the global ILRS network.

Practical relevance of the Doctoral Thesis

In the same way as other Member states of the European Union, the Latvian Geospatial Information Agency (LGIA) from Latvian side in cooperation with IAG Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe (EUREF) tends to focus on the realization of a modern and precise continental reference frame in Europe through the establishment and maintenance of European Terrestrial Reference System (ETRS89) and European Vertical Reference System (EVRS). ETRS89 provides geocentric three-dimensional positions with millimetre accuracy in the homogeneous reference system for the whole Europe, and EVRS does the same for the height component. These systems provide a basis for geo-referencing in Europe. ETRS89 is commonly used for modern mapping and Earth science applications. EUREF Permanent Network (EPN), as a key instrument in maintaining ETRS89, empowers conditions for the European cooperation in the International GNSS Service (IGS) and contributes to the realization of the International Terrestrial Reference System (ITRS), as well as to the monitoring of tectonic deformations in Europe, long-term climate monitoring and development of the standards and the operational means to disseminate GNSS data (EUREF, 2008).

The main practical gain as a result of reaching the objective of the Doctoral Thesis is the data on the Latvian GNSS station horizontal and vertical velocity fields, which gives an understanding of the geodynamic processes having occurred due to Fennoscandian land uplift phenomenon in the territory of Latvia, and serves as a basis for the high-precision coordinate determination.

The verification of GNSS station stability given in the Thesis according to the data of the produced catalogue and the station residual position RMS values could be taken into account during selection of a new site for the GNSS station installation.

The given description of the sea level variations at the Latvian coast could facilitate further research on the influence of the Baltic Sea loading on GNSS coordinate time series.

The demanding accuracy requirements in determining the geodetic and geodynamic parameters, as well as continuous improvements in the field of geopotential models, nutation and loading phenomenon models, have strongly necessitated the scientific examination of the comparative analysis of different strategies applied for the monitoring procedure. As each of the space geodetic techniques (GNSS, SLR, etc.) enjoys its own features and advantages in parameter determination, it is highly relevant through the optimal way to combine all observation resources.

The developments in the Thesis are the necessary base for further implementation of the GNSS and SLR observations in one combination. Furthermore, as the designed new satellite laser ranging device can be mobile, it provides the possibility of performing the observations at different sites, in that way contributing to the densification of the International Laser Ranging Service (ILRS) network.

Methodology of the research

The following research methods have been used in the process of carrying out the Doctoral Thesis:

- a) monographic or descriptive research method – used to study and describe the problem of the research by summarizing the information and on the basis of literature sources;
- b) computational method – used to process GNSS observations and obtain parameters (*Bernese GPS Software version 5.0, Bernese GNSS Software version 5.2*), as well as during star image reading and processing (software developed by the Institute of Geodesy and Geoinformatics of the University of Latvia);
- c) mathematical statistics method of the data – applied to perform the transformations of the GNSS station coordinates, as well as the derivation of the velocities and residual position RMS values (*Microsoft Excel, Fortran* executable code);
- d) method of analysis and synthesis – applied to describe the GNSS station velocity differences, as well as the characteristic features of the sea level dynamics at the Latvian coast;
- e) spectral analysis method – applied to identify the diurnal and semi-diurnal constituents in the sea level time series (*Fortran* executable code);
- f) graphical method – used to visualize the described and analysed processes (*Microsoft Excel, SELEN 2.9, GMT – The Generic Mapping Tools, MicroStation V8i, Solid Edge ST5*).

Theoretical and methodological bases of the research

The performed research is based on the following science fields and subfields:

- geodesy and geoinformatics;
- geodynamics;
- hydrology;
- geospatial research;
- fundamental astronomy;
- mathematics;
- computer science;
- optics;
- mechanics.

Scope of the study

Computed EUPOS[®]-Riga and LatPos station coordinates with reference to EUREF Permanent Network (EPN) and formalized station horizontal and vertical velocities are based on eight-year long GNSS observations – from 2008 to 2015. The time series of 30 stations located at the territory of Latvia have been analysed. Two solutions are presented: EUPOS[®] Combination Centre (ECC) cumulative weekly solution (2008–2014), and re-processed daily solution (2012–2015). For computation post-processing software package *Bernese* has been applied using Differential GNSS (relative) processing strategy. Station horizontal velocities are expressed in the ETRF2000 frame, and velocities for Up component – both in the ETRF2000 and ITRF2008.

The given description of the sea level variations at the Latvian coast is based on the observations of seven hydrological stations: Liepāja, Ventspils, Kolka, Mērsrags, Lielupes grīva, Daugavgrīva and Salacgrīva. The sea level data are the mean values of the last 15 minutes of an hour. The observation period covers three years (2013–2015) and is sufficiently long for characterising the sea level changes that appear during one year and for identifying four main tidal constituents (O_1 , K_1 , M_2 and S_2).

Laser ranging capability is one of the principal goals for the designed experimental instrument. The application of the calculated mount error model has ensured the resulting positioning accuracy generally within 10" to 20", which should already be adequate for an automatic ("blind") low-orbit satellite ranging. Hopefully, the further adjustment of mount mechanics and the improvement of mount error model structure are expected to eventually improve the positioning accuracy to 5" to 10" or less.

Results presented for the defence

The following main results have been achieved in the development of the Doctoral Thesis:

- 1) the data on the Latvian GNSS station horizontal and vertical velocity fields;
- 2) the catalogue containing information on EUPOS[®]-Riga and LatPos station location and their position time series;
- 3) the correlation of the Latvian GNSS station displacements with the data of the deformation model NKG_RF03vel;
- 4) the description of the sea level variations at the Latvian coast;
- 5) the designed innovative and universal satellite laser ranging device.

Structure of the Doctoral Thesis

The present Doctoral Thesis is an independent scientific research. It consists of an annotation, an introductory part, 5 chapters, main conclusions, 2 appendices, and the list of references with 111 sources. The Thesis includes 61 figure, 26 formulas, and 9 tables. The total volume of the Thesis is 136 pages.

APPROBATION OF THE RESEARCH RESULTS

Scientific publications

- 1) Haritonova, D., 2016. Sea level variations at the Latvian coastal hydrologic stations. *Geodesy and Cartography* 42 (2): 31–38 (indexed by SCOPUS).
- 2) Balodis, J., Silabriedis, G., Haritonova, D., Morozova, K., Zarins, A. and Rubans, A., 2016. Recent research activities at the Institute of Geodesy and Geoinformatics. *Proc. of ESA Living Planet Symposium*, ESA SP-740: 5 pages.
- 3) Zariņš, A., Haritonova, D., Rubans, A., Silabriedis, G. and Zvirgzds, J., 2016. Field tests of astrometric subsystem. *Geodesy and Cartography* 42 (1): 1–6 (indexed by SCOPUS).
- 4) Haritonova, D., Balodis, J., Janpaule, I. and Morozova, K., 2015a. Earth's surface displacements from the GPS time series. Proc. of the 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 96: 10 pages (indexed by Web of Science).
- 5) Balodis, J., Silabriedis, G., Haritonova, D., Kaļinka, M., Janpaule, I., Morozova, K., Jumare, I., Mitrofanovs, I., Zvirgzds, J., Kaminskis, J. and Liepiņš, I., 2015. Development of the one centimeter accuracy geoid model of Latvia for GNSS measurements. Proc. of the 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 96: 9 pages (indexed by Web of Science).
- 6) Janpaule, I., Haritonova, D., Balodis, J., Zarins, A., Silabriedis, G. and Kaminskis, J., 2015. Improvement of Latvian geoid model using GNSS/levelling, GOCE data and vertical deflection measurements. *Proc. of 5th International GOCE User Workshop*, ESA SP-728: 4 pages.
- 7) Balodis, J., Zarins, A., Haritonova, D. and Janpaule, I., 2014. Parameters for automated star identification. *Geodesy and Cartography* 40 (4): 163–170 (indexed by SCOPUS).
- 8) Balodis, J., Haritonova, D., Janpaule, I., Normand, M., Silabriedis, G., Zarins, A., Rubans, A., Kalinka, M., Jumare, I. and Lasmane, I., 2013. On the geodynamics in Latvia. *Proc. of ESA Living Planet Symposium*, ESA SP-722: 8 pages.
- 9) Haritonova, D., Balodis, J., Janpaule, I. and Normand, M., 2013. Displacements at the GNSS stations. *Proc. of 4th International Scientific Conference "Civil Engineering'13"*, Latvia University of Agriculture: 5 pages.
- 10) Haritonova, D., 2012. Solid Earth tides in the territory of Latvia. *RTU Scientific Proceedings "ĢEOMĀTIKA"*, Riga: 5 pages.

Reports at international scientific conferences

- 1) Haritonova, D., Balodis, J., Zarins, A. and Rubans, A. High precision techniques for Earth's crust movement observations in Latvia. *EUREF Symposium*, 25–27 May 2016, Donostia – San Sebastian: poster.
- 2) Haritonova, D. and Balodis, J. Earth's surface displacements from the GPS time series. *2nd International Conference: Innovative Materials, Structures and Technologies*, 30 September – 2 October 2015, Riga: presentation.
- 3) Balodis, J., Zarins, A., Rubans, A., Haritonova, D. and Kaminskis, J. Digital zenith camera – a new astrometric instrument for precision measurements in geodesy. *The FOTONIKA-LV conference "Achievements and Future prospects"*, 23–24 April 2015, Riga: presentation.
- 4) Haritonova, D., Zarins, A., Rubans, A. and Janpaule, I. Project of multi-purpose optical tracking system: design and deformations of optical system's transmitting path. *The FOTONIKA-LV conference "Achievements and Future prospects"*, 23–24 April 2015, Baldone: poster.
- 5) Haritonova, D., Janpaule, I., Rubans, A. and Zarins, A., 2015b. Project of multi-purpose optical tracking system. *EGU General Assembly*, 12–17 April 2015, Vienna: poster.
- 6) Haritonova, D. Earth tide observations and analysis methods. *73rd Annual Scientific Conference of the University of Latvia*, Section: The Project "FOTONIKA-LV – FP7-REGPOT-CT-2011-285912" – the third year scientific outcomes, 6 February 2015, Riga: poster.
- 7) Janpaule, I., Haritonova, D., Zarins, A. and Balodis, J. Improvement of Latvian geoid model using GOCE data and vertical deflection measurements. *5th International GOCE User Workshop*, 25–28 November 2014, Paris: poster.
- 8) Haritonova, D., Zarins, A., Rubans, A. and Janpaule, I. Project of multi-purpose optical tracking system: design and deformations of optical system's transmitting path. *1st International Conference "Nocturnal Atmosphere, Remote Sensing and Laser Ranging: NOCTURNAL – Riga 2014"*, 16–22 October 2014, Riga: poster.
- 9) Haritonova, D., Balodis, J., Zarins, A., Rubans, A. and Janpaule, I. Application of GNSS observation results to determination of the ground deformations. *EUREF Symposium*, 3–7 June 2014, Vilnius: poster.
- 10) Haritonova, D., Balodis, J., Janpaule, I., Jumare, I. and Normand, M. Earth's surface movements in Latvia. *72nd annual scientific conference of University of Latvia*, Section: The Project "FOTONIKA-LV – FP7-REGPOT-CT-2011-285912" – the second year scientific outcomes, 7 February 2014, Riga: poster.
- 11) Haritonova, D., Balodis, J. and Janpaule, I. Investigating effects in GNSS station coordinate time series. *"Innovative Materials, Structures and Technologies" in the framework of the 54th International Conference of Riga Technical University*, dedicated to the 150th Anniversary of the Faculty of Civil Engineering of Riga Technical University, 8 November 2013, Riga: presentation.

- 12) Balodis, J., Haritonova, D., Janpaule, I., Normand, M., Silabriedis, G., Zarins, A., Rubans, A., Kalinka, M., Jumare, I. and Lasmane, I. On the geodynamics in Latvia. *ESA Living Planet Symposium*, 9–13 September 2013, Edinburgh: poster.
- 13) Haritonova, D., Balodis, J., Janpaule, I. and Normand, M. Displacements at the GNSS stations. *International scientific conference “Civil Engineering ’13”*, 16–17 May 2013, Jelgava: presentation.
- 14) Haritonova, D., Balodis, J., Janpaule, I. and Normand, M. GNSS station displacement analysis. *EGU General Assembly*, 7–12 April 2013, Vienna: poster.
- 15) Haritonova, D., Kaminskis, J. and Lasmane, I. Analysis of kinematic coordinates from GNSS stations in Latvia. *NKG Science Week*, 12–14 March 2013, Reykjavik: presentation.
- 16) Haritonova, D. GNSS station kinematic coordinate analysis. *71st annual scientific conference of University of Latvia*, Natural sciences photonics, 1 February 2013, Riga: poster.
- 17) Haritonova, D. GNSS station kinematic coordinate analysis. *Riga Technical University 53rd International Scientific Conference*, dedicated to the 150th Anniversary, the 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute / RTU Alumni, 11–12 October 2012, Riga: presentation.
- 18) Haritonova, D. The impact of solid Earth tides on the DGNSS positioning results. *United Nations / Latvia Workshop on the Applications of Global Navigation Satellite Systems*, 14–18 May 2012, Riga: presentation.

CONTENTS OF THE THESIS

The introductory chapter of the Doctoral Thesis includes the topicality of the subject, the objective of the Thesis and the tasks to achieve it, as well as the scientific novelty and practical relevance of the Thesis.

1. GEODYNAMICS

Geodynamics is a science dealing with the processes operating in the Earth's system. Within this chapter, the topics on crustal motion, reference frames, postglacial rebound and ocean tides are summarized.

Recent crustal movements

The increasing accuracy of the satellite-based geodetic positioning techniques makes it possible to derive the information on the crustal motions from repeated or continuous observations. The following main fields of the application for crustal motion monitoring can be identified (Seeber 2003):

- a) global and continental plate motion and deformation analysis,
- b) regional crustal motion analysis, and
- c) local monitoring of deformation and subsidence.

Reference frame definition

The conventional terrestrial reference system, established and maintained by the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) and nearly exclusively used for today's scientific and practical purposes, is the International Terrestrial Reference System (ITRS); its realization is the International Terrestrial Reference Frame (ITRF).

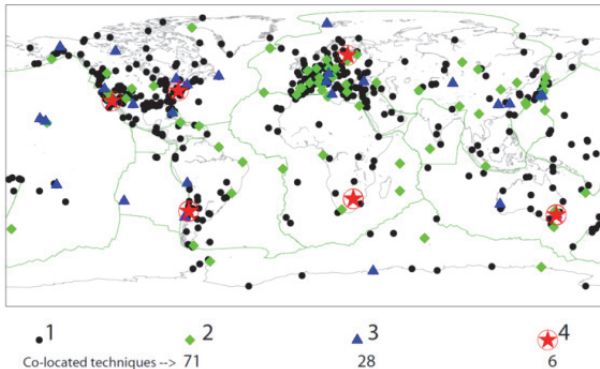


Fig. 1.1. ITRF2008 sites and co-located techniques: 1 technique is marked with a circle, 2 co-located techniques – a diamond, 3 – a triangle and 4 – a star (Petit and Luzum 2010).

Each new ITRF is realized based on new observations with space geodetic techniques such as DORIS, GPS, SLR and VLBI (Seeber 2003). Fig. 1.1 displays ITRF2008, which is composed of 934 stations located at 580 sites.

Since today's geodetic space techniques provide station coordinates at the 1-cm or sub-centimetre level, it is necessary to model the various deformations at the millimetre level. The main influences are global plate tectonics, solid Earth tides, ocean and atmospheric loading effects, polar tides, and regional and local effects.

According to Boucher *et al.* (1992), one can derive from each annual ITRF_{yy} a corresponding frame in ETRS89, which will be itself labelled ETRF_{yy} and is a regional realization of the ITRS for Europe.

Postglacial rebound

In Fennoscandia and Canada, the crust has been continuously rising since the deloading of the ice sheets at the end of the Ice Age (see Fig. 1.2). This phenomenon is well known as the postglacial rebound or the postglacial land uplift. It is mainly an isostatic rebound governed by the viscous properties of the mantle, to some extent modified by the presence of the elastic crust (Kakkuri 1993).

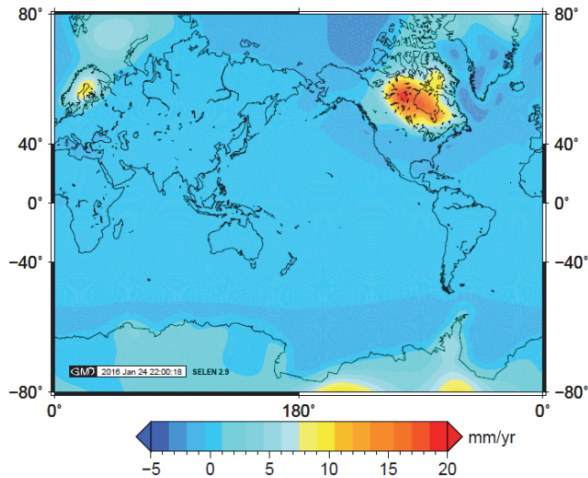


Fig. 1.2. Global map of the GIA-induced rate of vertical displacement today: from -3.5 to $+19.2$ mm/yr (Spada and Melini 2013).

Land uplift is the only one of the processes related to Glacial Isostatic Adjustment (GIA), which is the response of the solid Earth to the changing mass of glaciers and ice sheets. The study of GIA is multi-disciplinary. GIA leads to changes in the gravity field, Earth rotation, and the stress in the crust, which can affect the sea level (Poutanen and Steffen 2014). Fig. 1.3 represents the interaction between the effects involved.

Land uplift is the most notable geodynamic process in Fennoscandia. The land uplift maximum is near the city of Umeå (Steffen and Wu 2011), where the current absolute uplift is about 10 mm/yr, and during the last century the uplift rate relative to the sea reached almost 9 mm/yr (Poutanen and Steffen 2014).

The latest Nordic uplift model NKG2005LU (Vestøl 2006; Ågren and Svensson 2007) is based on levelling, tide gauges, and geophysical modelling. It was initiated and computed in the Nordic Geodetic Commission (NKG) working group for height determination (Nordman *et al.* 2014). The North- and East-components of the deformation model NKG_RF03vel (see Fig. 1.4) origin from the GIA model presented in Milne *et al.* (2001). The velocity field from this model has been transformed to the GPS-derived velocity field in Lidberg (2004).

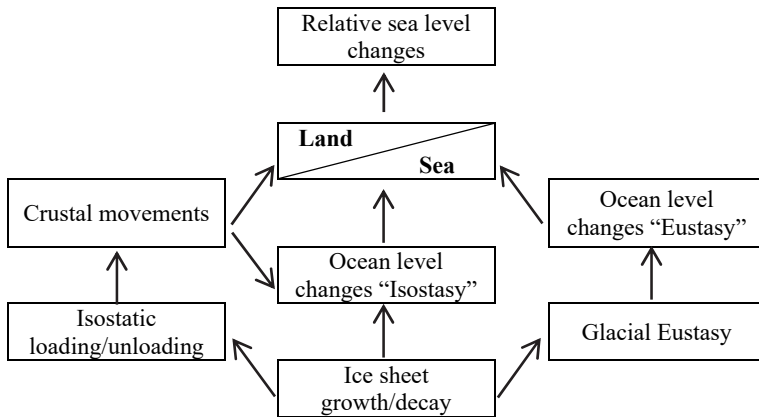


Fig. 1.3. GIA and relative sea-level change (Steffen 2015).

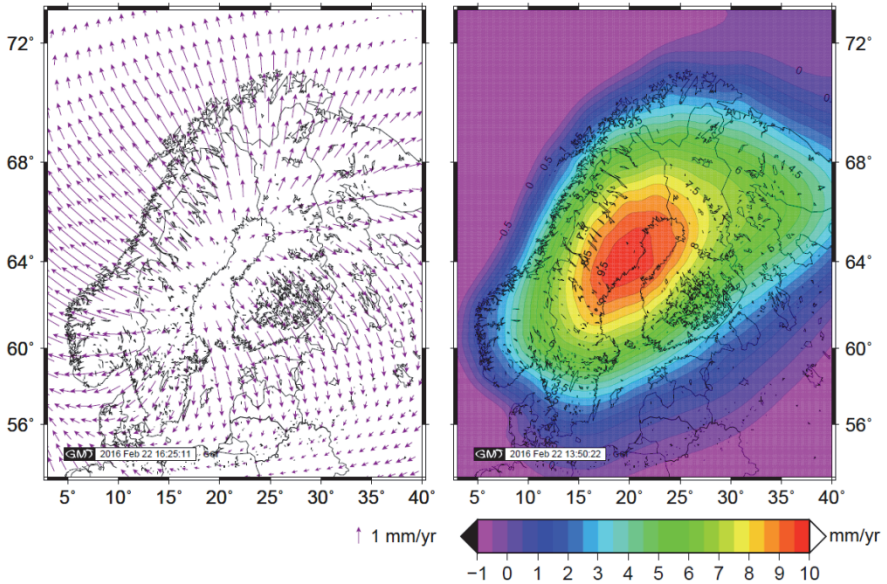


Fig. 1.4. The deformation model NKG_RF03vel: horizontal velocities according to Lidberg (2004) (left) and vertical velocities from the NKG2005LU(ABS) model (right).

New Nordic uplift models are currently in preparation; they take into account the latest advances in observation techniques and modelling (Poutanen and Steffen 2014).

Effect of the ocean tides

The ocean tides are generated by the same gravitational forces as the solid Earth tides, but the ability of the ocean to redistribute the mass shapes own dynamics to the ocean tides. The ocean tide behaviour in any spot of the coast is strongly affected by the shape of the coastline and the seabed profile. Therefore, the ocean tides have the same spectrum as the solid Earth tides but different amplitude and phase (Doan and Brodsky 2006).

The ocean tide models are required to calculate the loading response at a point. Some of them are based on the hydrodynamic modelling, and others – on the satellite altimetry observations. In general, the satellite altimetry based ocean tide models are best in the open ocean areas, while the models based on the tide gauge data and hydrodynamic modelling are best near the coastal areas (Khan 2005).

2. GNSS

GNSS includes the U.S. NAVSTAR Global Positioning System (GPS), the Russian GLObalnaya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS), and, in the future, also the European system – Galileo, etc.

The very high accuracy potential associated with comparatively easily transportable equipment makes GNSS a suitable technique for determining recent crustal movements. Due to availability of fully automatic, low power consumption GNSS receivers and the capacity to transfer data over large distances, continuous observations at permanent installations are more and more applied (Seeber 2003).

This chapter gives an overview of GNSS positioning and provides an introduction to the correction concepts.

Introduction

The fundamental equation of satellite geodesy can be formulated as

$$\mathbf{r}_S(t) = \mathbf{r}_B(t) + \boldsymbol{\rho}(t), \quad (2.1)$$

where $\mathbf{r}_S(t)$ describes the satellite position; $\mathbf{r}_B(t)$ – the location of the observation station; and $\boldsymbol{\rho}(t)$ – a relation between the observations. In the estimation process either all parameters can be treated as unknown, or some of the parameters are considered to be known, in order to stabilize and simplify the solution.

The satellite and the observation point are both functions of time, in other words, the equation (2.1) contains the time dependent effects, which can be subdivided into three main groups.

The first group includes Earth rotation, polar motion, solid Earth tide, ocean tide loading, etc. The second group can be related to the satellite orbit motions. The third group considers clock parameters and effects, which delay the signal propagating from the satellite to the GNSS receiver. The main “signal delaying” effects here are the tropospheric and the ionospheric delays.

For the solution of a general and global parameter estimation problem, the observations of a large number of different satellites are required from many globally distributed stations (Seeber 2003).

Relative positioning

The objective of relative positioning is to determine the coordinates of an unknown point with respect to a known point, which usually is stationary, i.e., relative positioning aims at the determination of the vector between the two points, which is often called the baseline vector or baseline (see Fig. 2.1).

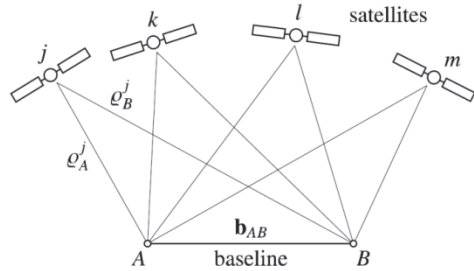


Fig. 2.1. Basic concept of relative positioning (Hofmann-Wellenhof *et al.* 2008).

Relative positioning requires simultaneous observations at the reference and the unknown points. Assuming such simultaneous observations, linear combinations can be formed leading to single-differences, double-differences, and triple-differences (Hofmann-Wellenhof *et al.* 2008).

The single-differences can be performed between two receivers or two satellites. The double-differences are performed between the pair of receivers and the pair of satellites. This eliminates the receiver clock errors and the satellite clock errors. Furthermore, the triple-differences, which are the differences of double-differences at two different epochs, are performed to eliminate phase ambiguities within given intervals (Khan 2005).

The method of double-differences is widely used. In the computation, a network is formed, which consists of reference (fiducial) stations and stations with unknown coordinates. The advantage of a network is that almost all errors common to the network cancel each other out either partially or totally; these errors include troposphere, ionosphere, and tidal and non-tidal loading (Nordman 2010).

3. EARTH'S SURFACE MOVEMENTS AT THE LATVIAN GNSS STATIONS

The vertical and horizontal displacements of the Earth's surface can be measured to a high degree of precision by using GNSS.

The local surface displacements obtained from the Latvian GNSS station position time series are under discussion in this study. As Latvia is located in the region that is under the effect of the ongoing relaxation of the Earth in response to the past ice mass loss, the comparison of obtained results with the data from the deformation model NKG_RF03vel is presented (Haritonova *et al.* 2015a).

Participation in EUPOS® ECC

The EUPOS® initiative represents an international expert group of the public organisations coming from the field of geodesy, geodetic survey and cadastre. The partners from Central and Eastern Europe work on the provision of compatible spatial reference

infrastructures by operating Differential GNSS EUPOS[®] reference station services (Rosenthal 2008).

In order to further strengthen the national EUPOS[®]/ETRS89 realizations and ensure the homogeneity of the national EUPOS[®] services, EUPOS[®] Combination Centre (ECC) has been established. The main task of the ECC is the combination of the weekly national EUPOS[®] SINEX solutions into a single weekly EUPOS[®] solution. The EUPOS[®] combined solution may be regarded as the further densification of the actual ETRS89 realization.

The Institute of Geodesy and Geoinformatics of the University of Latvia (LU GGI) calculates and submits the Latvian SINEX solutions to ECC regularly.

Latvian GNSS networks

Within the framework of EUPOS[®] regional development project, two GNSS permanent station networks have been developed in Latvia – LatPos (Zvirgzds 2007; Zvirgzds 2012) and EUPOS[®]-Riga (Abele *et al.* 2008), which have been operating since 2006.

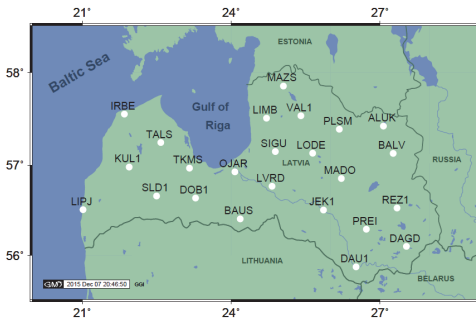


Fig. 3.1. Actual LatPos network with 24 continuously operating GPS/GNSS stations.

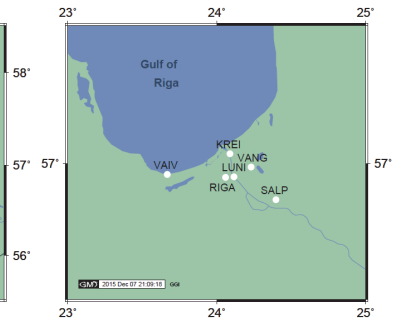


Fig. 3.2. EUPOS[®]-Riga and IGS/EPN station RIGA.

At present, the LatPos network includes 24 permanent stations, as shown in Fig. 3.1. EUPOS[®]-Riga network consists of five stations (see Fig. 3.2), which are located in Riga and its surroundings. The location of RIGA station from the IGS and EPN networks is shown as well.

Network solution and data processing

The time series of GNSS station positions of both EUPOS[®]-Riga and LatPos networks have been computed by *Bernese* software developed at the University of Bern, Switzerland. Applying *Bernese GPS Software version 5.0* (Beutler *et al.* 2007), the station diurnal coordinates have been obtained for a seven-year long observation period – from 2008 to 2014. Since 2015, the *Bernese GNSS Software version 5.2* (Dach *et al.* 2015) has been used for data calculation.

Table 3.1

Flow chart of GNSS data processing

Steps	Institution	Additional description	ECC cumulative weekly solution (2008–2014)	GGI daily solution (2012–2015)
Data processing	GGI	Software	<i>Bernese GPS Software version 5.0</i>	<i>Bernese GNSS Software version 5.2</i>
		Data sets	IGS and CODE databases	CODE database
		Observations (RINEX files)	GPS	GPS and GLONASS (since 1st day of 2015)
		Fiducial stations	5–7 EPN (A and B-class)/IGS stations	9 EPN (A-class)/IGS stations
Station coordinates and transformations	ECC/ GGI	–	Daily solutions in IGS05/08: composed to weekly SINEX solutions and submitted to ECC for further combination into a single weekly EUPOS [®] solution	Daily solutions in IGB08: ITRF2008-to-ETRF2000 one-step transformation using 14 transformation parameters according to (Boucher and Altamimi 2011)
Time series analysis and trend derivation	ECC/ GGI	–	–	Corrections for offsets, outlier elimination
Station velocities and RMS	ECC/ GGI	–	Horizontal velocities are expressed in the ETRF2000 frame, and velocities for Up component – in the ITRF2008	

Within the frames of the Thesis, to ensure data control and homogeneity, it was decided to re-compute GNSS station positions of both networks for the period from 2012 to 2014 applying the latest version of the software, in this way obtaining the time series for four years (2012–2015) by *Bernese version 5.2*.

CODE (IGS before) precise orbits, Earth orientation and clock products with CODE final ionosphere product were used for GNSS data processing. The dry global mapping function (DRY_GMF) as the *a priori* troposphere model was used; a cut-off elevation angle of 3° was selected. The positions for all stations are corrected for solid Earth tide effect (Petit and Luzum 2010), as well as the ocean tide loading (FES2004 ocean tide model was selected).

For computation, the Differential GNSS (relative) processing strategy has been implemented.

Table 3.1 summarizes all steps performed to obtain station velocities and RMS values from GNSS observations for both solutions (Haritonova *et al.* 2016).

Results and discussion

The final velocity components derived from the ECC minimum constrained cumulative solution are depicted in Figs 3.3 and 3.4. Fig. 3.3 shows the station vertical movements, and Fig. 3.4 represents the horizontal movements. Additionally, the velocities from the deformation model NKG_RF03vel are shown with light vectors.

After outstanding data elimination, the resulting range of vertical velocities from ECC cumulative weekly solution equals to 2.05 mm/yr, which makes from -0.56 to $+1.49$ mm/yr. According to the model NKG_RF03vel, the vertical velocities of Latvian GNSS stations have a positive sign; the velocity range runs up to 1.68 mm/yr, with the minimum $+0.04$ mm/yr and the maximum $+1.72$ mm/yr.

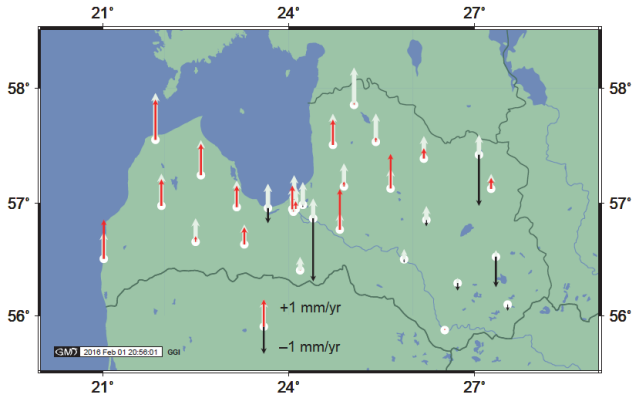


Fig. 3.3. Latvian GNSS station cumulative vertical movements from EUPOS[®] observation set and vertical velocities from the model NKG_RF03vel.

As to horizontal movements, also the velocity field is not homogeneous, showing the outstanding movements for some stations. Nevertheless, the site velocities are mostly oriented to the south and fail to exceed 1 mm/yr. In this case, one can observe relatively good correlation to the velocity field from the deformation model NKG_RF03vel.

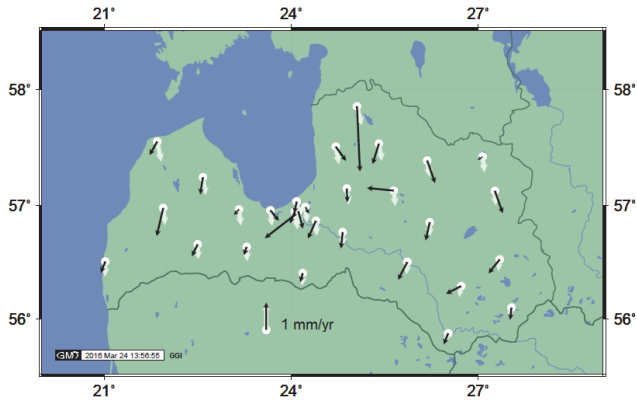


Fig. 3.4. Latvian GNSS station cumulative horizontal movements from EUPOS[®] observation set and horizontal velocities from the model NKG_RF03vel.

The station vertical velocities obtained from the daily solution are shown in Fig. 3.5. In the same manner as above, the vertical velocities from the model NKG_RF03vel are shown as well. The differences between two data sets are depicted in Fig. 3.6.

As can be seen, the vertical velocities have a positive sign, and only one station (SALP) has an outstanding velocity. After its elimination, the resulting range of vertical velocities comes up to 1.16 mm/yr, which is less in compared to the range from ECC cumulative weekly solution and uplift range according to the model NKG_RF03vel.

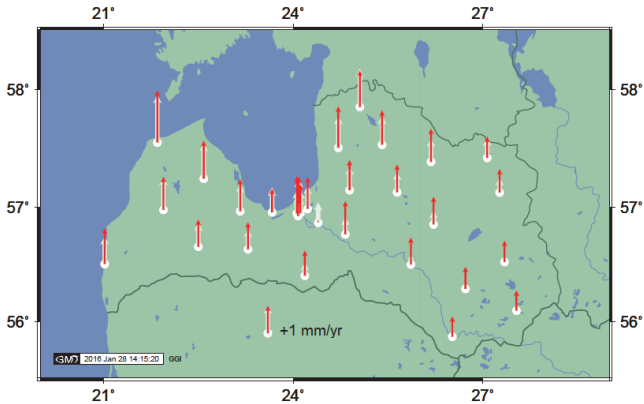


Fig. 3.5. Latvian GNSS station vertical movements obtained from the daily solution (2012–2015), and vertical velocities – from the model NKG_RF03vel.

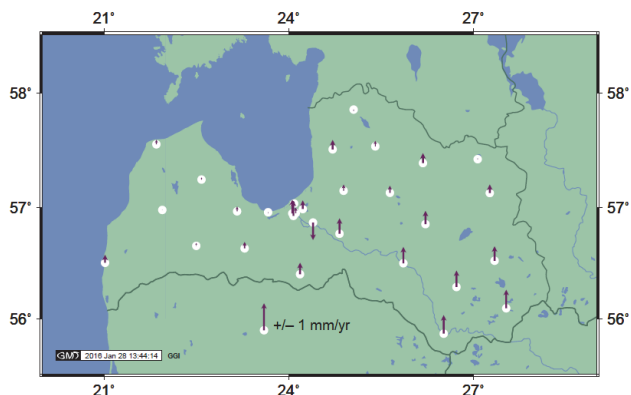


Fig. 3.6. Differences between vertical velocities obtained from the daily solution (2012–2015) and from the model NKG_RF03vel.

In Fig. 3.6, one can observe that the movements of western GNSS stations correspond to the data of NKG_RF03vel. The highest velocity differences in Up component between the results obtained and the values from the model NKG_RF03vel are more pronounced in the case of the stations located in south-eastern part of Latvia; however, these differences are less than 1 mm/yr.

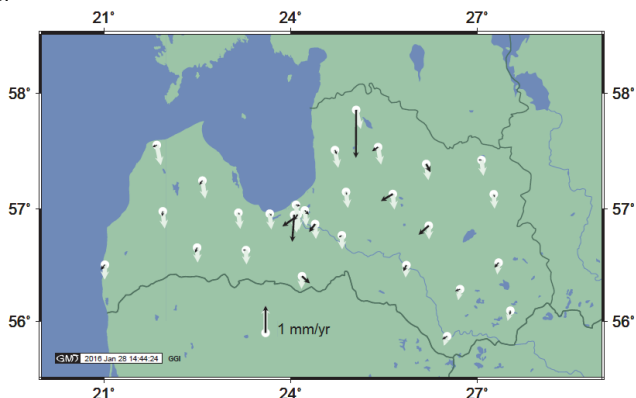


Fig. 3.7. Latvian GNSS station horizontal movements obtained from the daily solution (2012–2015), and horizontal velocities – from the model NKG_RF03vel.

The station horizontal movements obtained from the daily solution are shown in Fig. 3.7. The magnitude of velocities for a larger number of stations comes to a few tenths of a millimetre. These velocities are less pronounced in comparison with the horizontal movements from the EUPOS® observation set. Nevertheless, one can observe that their orientation mostly corresponds to the orientation of horizontal movements according to the model NKG_RF03vel.

4. SEA LEVEL VARIATIONS AT THE LATVIAN COASTAL HYDROLOGICAL STATIONS

Such geodynamic effect as the ocean tide loading is commonly removed from GNSS measurements pursuant to the recommendations disclosed by IERS Conventions. At the same time, there is also the effect of non-tidal ocean loading variation having its own impact on geodetic observations. The Baltic Sea exhibits a number of remarkable phenomena. One of them is the sea level variations due to winds, complicated by the shape of gulfs and islands. Under this influence, the range of the sea level variations can reach 3 m on the coasts of gulfs. However, the tidal variations of the Baltic Sea range in the order of centimetres only.

This chapter gives clear description of the water level variations of the Baltic Sea at the Latvian coast, which is potential enough to facilitate further research on the influence of the Baltic Sea loading on the GNSS coordinate time series.

Data selection and processing

For this study, the observations from seven sea level stations have been used. The locations of the selected stations are shown in Fig. 4.1.

The sea level data are the mean values of the last 15 minutes of an hour, in this way having 24 values for each day. During the three-year period (2013–2015), there were some short gaps in the time series of each sea level station, mostly 1 to 3 hour long. To perform spectral analysis, the data has been interpolated. In the case of long gaps, the data of a whole year has not been used.

The Fourier transform with Parzen window has been applied to perform spectral analysis. The sea level time series have been detrended separating non-harmonic influence (Haritonova 2016).

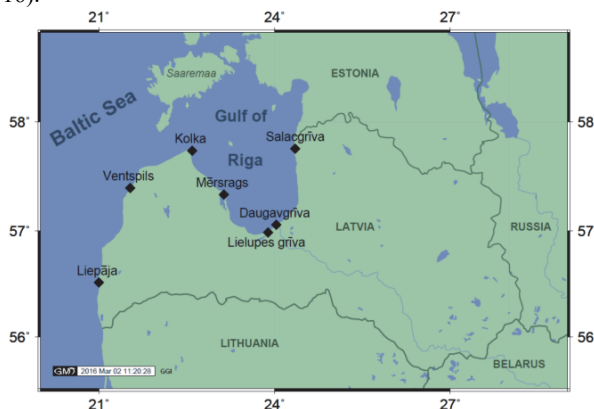


Fig. 4.1. Latvian sea level stations: Liepāja, Ventspils, Kolka, Mērsrags, Lielupes grīva, Daugavgrīva, and Salacgrīva.

Results and discussion

The sea level dynamics at the Latvian coast is shown in Fig. 4.2, where the differences between sea level maximum and minimum at appropriate stations are given.

It can be observed that the sea level differences are mostly increasing with every next station. The stations Liepāja, Ventspils, and Kolka have the smallest sea level differences in the background of other station data for all three years. It can be explained by the fact that the stations have direct access to the open sea and their locations are close to the nodal line of sea level variations (Ekman 2009); the short-term variations are nearly eliminated, and the long-term sea level variations have mean values here.

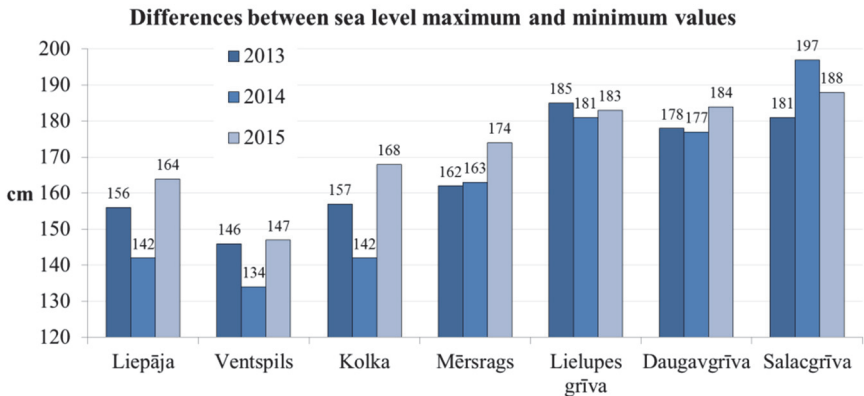


Fig. 4.2. Differences between sea level maximum and minimum values at the seven Latvian coastal hydrological stations given for three years.

Additionally, the differences between the sea level maximum and minimum at the stations Liepāja, Ventspils, and Kolka have more pronounced annual changes in comparison with the data of other stations. The explanation of this could be the annual meteorological conditions of the Baltic Sea, whose changing is more observable in the open sea.

According to Wübbler and Krauss (1979), the Gulf of Riga is of considerable importance for the seiches of the Baltic Sea. The sea level variations in the interior areas of the gulfs behave like standing waves; this holds for the Gulf of Riga as well. It exhibits the highest amplitudes, which seems to be due to a co-oscillating mode of this basin.

The sea level stations Lielupes grīva, Daugavgrīva, and Salacgrīva are more eastern stations of the Gulf of Riga. The sea level differences at these stations show the highest values that absolutely correspond to the previous statement.

The results obtained after spectral analysis are shown in Fig. 4.3; it represents the mean magnitudes of tidal constituents obtained from the values of each year. Totally, four main tidal waves (O_1 , K_1 , M_2 and S_2) have been identified in the spectrum of the sea-level changes.

It can be observed that the magnitudes of the tidal oscillations obtained at the Gulf of Riga (Kolka, Mērsrags, Lielupes grīva, Daugavgrīva, Salacgrīva) are higher than those obtained at the west coast of Latvia (Liepāja and Ventspils). The explanation of this effect is the following: the changes in the sea level at the coast of the Baltic Sea are more dependent on meteorological forcing than at the coast of the Gulf of Riga; the spectral noise produced by it prevents from identifying of the true magnitudes of tidal oscillations.

The magnitude of diurnal constituent O_1 is the highest for all stations. Close to it is the magnitude of diurnal constituent K_1 , except the two stations Salacgrīva and Kolka, which are more northern Latvian stations in the Gulf of Riga. It is noticeable that the magnitude of diurnal constituent K_1 is practically equal to the magnitude of semi-diurnal constituent M_2 at the station Ventspils. Comparing semi-diurnal constituents, the magnitude of M_2 is 3 to 5 times higher than the magnitude of S_2 , but not in the case of station Liepāja, where these magnitudes are sub-equal.

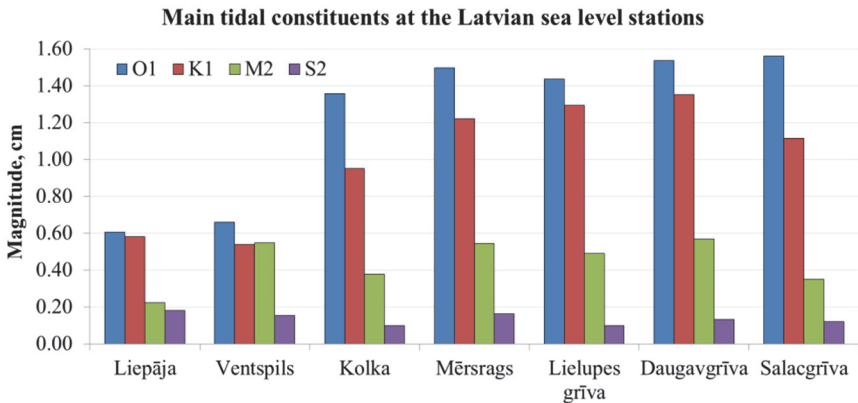


Fig. 4.3. Magnitudes of main tidal constituents at the Latvian coastal hydrological stations.

Additionally, the spectral density functions have shown explicit power at the frequency of 5 cycles per day. This frequency fails to correspond to the tidal frequency. The magnitude of this oscillation is not considerable; it makes up about 1 mm. However, it is worth noting that this is typical only for the stations Mērsrags, Lielupes grīva, and Daugavgrīva. As these sea level stations are located relatively close together in the Gulf of Riga, the power could represent some local effect.

5. DESIGN OF A NEW MULTI-PURPOSE OPTICAL TRACKING SYSTEM

The main results of the development of a universal satellite laser ranging device are interpreted in this chapter.

In the capacity of a well-proven geodetic technique, Satellite Laser Ranging (SLR) offers a significant potential to contribute to the scientific studies of the solid Earth, its ocean and atmospheric systems. As SLR enables the most accurate determination of the geocentric positions of the Earth satellites, it truly provides a reliable reference system to monitor the postglacial rebound, sea level and ice volume changes.

This chapter aims to provide an overview of the observation methods and explicate the design of a new multi-purpose optical tracking system intended for both positional and laser ranging observations of near-Earth objects. Moreover, the key findings derived from the functionality tests of an astrometric subsystem have been interpreted here.

Methods and their importance

The determination of the directions from the ground to satellites based on optical observations is one of the early methods of satellite geodesy leading to remarkable results. In addition, the optical tracking of satellites is of fundamental importance because it is the only technique in satellite geodesy that directly establishes the access to the inertial reference frame.

In the last decade of the 20th century the fast development of electronic position sensors, in particular the Charge Coupled Device (CCD), initiated a revival of optical methods in astrometry and also satellite geodesy.

In laser distance measurements to satellites, the time of the flight of a laser pulse (as it travels between a ground station and a satellite) is observed.

New fields of SLR application have been evolving with the increasing accuracy of the measuring systems. With an accuracy range of ± 1 cm or better, considerable contributions can be made to the establishment of reference frames, geodynamics, the determination of precise satellite orbits, and the modelling of Earth's gravity field (Seeber 2003).

Design of the new instrument

The construction design of the instrument has been completed – all major components have been manufactured or purchased to be assembled together (see Figs 5.1 and 5.2) (Balodis *et al.* 2016).

As active mode observations, including daytime tracking, require precise pointing, an original optical scheme with three optical channels, i.e., one transmitter and two receivers, has been designed. The one of the twin optical systems is fitted with a CCD and used for astrometric purposes, including mount pointing direction determination, object coordinate determination and motion guiding. The other, fitted with a reflected light pulse detector, will be used for SLR pulse processing (Kaminskis *et al.* 2015; Haritonova *et al.* 2016).

The target technical features of the system are (Zarins *et al.* 2015):

- a) twin 41-cm optical systems on Alt-Alt mount, separate transmitted beam collimator;
- b) motors and control sensors for pointing and tracking of any orbital object with positioning accuracy within a few arcseconds;
- c) positional observation accuracy within a fraction of arcsecond for objects with optical magnitude up to 15m;
- d) SLR capability (depending on laser transmitter properties) up to geostationary orbit;
- e) option of simultaneous positional and SLR observations – usage of both optical systems in various combinations.

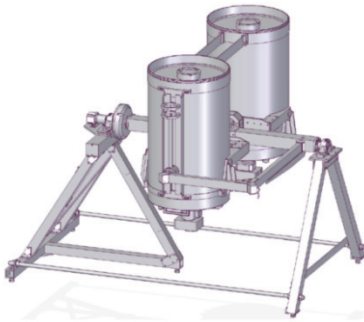


Fig. 5.1. Design of the new multi-purpose optical tracking system.



Fig. 5.2. Installation of the instrument.

Field tests and mount error model

The main objectives of the field tests were the evaluation of performance capabilities and determination of parameters for optimal imaging and data processing.

Being a particularly demanding application, SLR requires high and technically precise accuracy for instrument positioning. Real-time astrometric position availability can be quite useful for positioning system testing and calibration.

This section reflects the results of functional tests and deals with the adjustment of control software and hardware components for a multi-purpose optical tracking system (Zariņš *et al.* 2016).

Laser ranging capability is one of the principal design goals for the device. To perform laser ranging in automatic (“blind”) mode, the pointing accuracy must be better than the transmitted beam divergence. As a sub-arcminute beam divergence is a common choice, it can be made a fraction of arcminute for ranging of far objects. Consequently, the pointing accuracy ideally should be within a few arcsecond range. It is difficult to ensure such accuracy by purely mechanical means. Instead, a mount error model, implemented in the control software, is applicable to introduce the necessary pointing corrections.

A problem is to find a simple mathematical model, effectively describing the physical deformations and misalignments of the mount. It is almost unfeasible to develop a reliable theoretical deformation model. Therefore, the approximating models, based on position measurement data, are being used instead.

3-D representation of mount error model behavior is shown in Fig. 5.3. Offset values represent the encoder zero-point marker position relative to the instrument coordinate system zero-points. For better representation of variability, they are removed from the graphs. The asymmetric character of the model graphs probably is the result of axes non-orthogonality with the value of 2 to 4 arcminutes. The considerable part of mount errors could account for the result of deformations caused by unbalancing of axes.

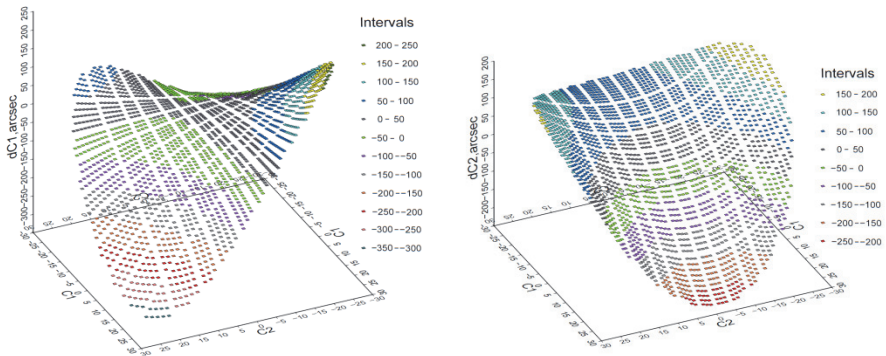


Fig. 5.3. Mount error model: corrections of primary axis rotation (C1) (left) and secondary axis rotation (C2) (right) as the functions of position.

The application of the calculated mount error model has ensured the resulting positioning accuracy generally within 10" to 20", which should already be adequate for a “blind” low-orbit satellite ranging. Hopefully, the further adjustment of mount mechanics and the improvement of mount error model structure are expected to eventually improve the positioning accuracy to 5" to 10" or less.

The field tests of an astrometric subsystem of the satellite laser ranging device have verified the imaging and positioning performance of the device in compliance with the expected designed features. The mount error model parameters have been efficiently calculated; the resulting positioning accuracy is proved to be already adequate for SLR purposes.

MAIN CONCLUSIONS

- 1) The formalized data on the Latvian GNSS station horizontal and vertical velocity fields as well as their position time series from the created catalogue (in Appendix B), have shown that:
 - a) the obtained velocities reveal the effect of the Fennoscandian rebound in the territory of Latvia, because in the case of both solutions – weekly (2008–2014) and daily (2012–2015) – the EUPOS®-Riga and LatPos station vertical velocity vectors have maximum values in the western part of Latvia and minimum values in the eastern part of Latvia; these ranges fail to exceed 2 mm/yr;
 - b) the field of vertical velocities from the daily solution is more homogeneous in comparison with the weekly solution, but disagrees with the deformation model NKG_RF03vel in the south-eastern part of Latvia; however, the discrepancy is only under 1 mm/yr;
 - c) the horizontal velocity vectors have similar orientation for both solutions; vectors are mostly oriented to the south – according to the deformation model NKG_RF03vel, but they have different values;
 - d) the annual coordinate changes appear in the case of some GNSS stations; the most distinguished ones belong to the stations PREI, REZ1, SALP and SLD1. The effect is assumed to be caused by building deformations where GNSS antenna has been mounted, or ground deformations.
- 2) The given description of the sea level variations at the Latvian coast supplements the earlier results concerning the dynamics of the Baltic Sea in this region and
 - a) shows that the sea level ranging diapason is quite high in the Gulf of Riga – it ran up to 2 m during one year at the Salacgrīva station. In the stations Liepāja, Ventspils and Kolka, the diapason is not so high, but the differences between the sea level maximum and minimum have more pronounced annual changes in comparison with the data of other stations;
 - b) approves the existence of the diurnal (O_1 , K_1) and semi-diurnal (M_2 , S_2) tides both in the Gulf of Riga and in the Baltic Sea at the Latvian coast;
 - c) reveals the existence of non-tidal frequency of five cycles per day at the stations of the Gulf of Riga, which could represent some local effect typical for this gulf.
- 3) The field tests of the designed new original and universal satellite laser ranging device have shown that the resulting positioning accuracy is already adequate for SLR purposes; at the same time, there is a potential for improvement through the adjustment of mechanical properties and error model structure. The device offers an efficient innovative way to obtain the geodynamic data, and it can contribute to geodynamic studies not only in Latvia.

**PROMOCIJAS DARBA LITERATŪRAS ATSAUCES/
LIST OF REFERENCES OF THE THESIS**

1. Abele, M., Balodis, J., Balodis, K., Normand, M., Janpaule, I., Mitrofanovs, I., Rubans, A., Silabriēdis, G. and Zarins, A., 2008. Implementation of New Positioning System in Riga. *Int. Symp. EUREF*, 18–20 June 2008, Brussels: 6 pages.
2. Abele, M., Balodis, J., Janpaule, I., Lasmane, I., Rubans, A. and Zarins, A., 2012. Digital zenith camera for vertical deflection determination, *Geodesy and Cartography* 38 (4): 123–129.
3. Agnew, D. C. *Baytap08 User's Manual*, 2013: 30.
4. Ågren, J. and Svensson, R. Postglacial land uplift model and system definition for the new Swedish height system RH 2000. LMV-Rapport 2007: 4. *Reports in Geodesy and Geographical Information Systems*, Gävle, 2007: 124.
5. Altamimi, Z., Sillard, P. and Boucher, C., 2003. The impact of a No-Net-Rotation Condition on ITRF2000. *Geophysical Research Letters* 30 (2): 1064.
6. Balodis, J., Haritonova, D., Janpaule, I., Normand, M., Silabriēdis, G., Zarins, A., Rubans, A., Kalinka, M., Jumare, I. and Lasmane, I., 2013. On the geodynamics in Latvia. *Proc. of ESA Living Planet Symposium*, ESA SP-722: 8 pages.
7. Balodis, J., Silabriēdis, G., Haritonova, D., Kaļinka, M., Janpaule, I., Morozova, K., Jumare, I., Mitrofanovs, I., Zvirgzds, J., Kaminskis, J. and Liepiņš, I., 2015a. Development of the one centimeter accuracy geoid model of Latvia for GNSS measurements. Proc. of the 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 96: 9 pages.
8. Balodis, J., Silabriēdis, G., Haritonova, D., Morozova, K., Zarins, A. and Rubans, A., 2016. Recent research activities at the Institute of Geodesy and Geoinformatics. *Proc. of ESA Living Planet Symposium*, ESA SP-740: 5 pages.
9. Balodis, J., Zarins, A., Haritonova, D. and Janpaule, I., 2014. Parameters for automated star identification. *Geodesy and Cartography* 40 (4): 163–170.
10. Balodis, J., Zarins, A., Rubans, A., Haritonova, D. and Kaminskis, J. (b). Digital zenith camera – a new astrometric instrument for precision measurements in geodesy. *The FOTONIKA-LV conference "Achievements and Future prospects"*, 23–24 April 2015, Riga: presentation.
Available at:
<https://fotonikalv.wordpress.com/fotonika-lv-5th-anniversary-conference/>
11. Berglund, M., 2004. Holocene shore displacement and chronology in Ångermanland, eastern Sweden, the Scandinavian glacio-isostatic uplift centre. *Boreas* 33 (1): 48–60.
12. Beutler, G., Bock, H., Brockmann, E. et al. *User manual of the Bernese GPS Software Version 4.2*, University of Berne, 2000.
13. Beutler, G., Bock, H., Dach, R. et al. *User manual of the Bernese GPS Software Version 5.0*, Astronomical Institute, University of Bern, 2007: 612.

14. Boucher, C. and Altamimi, Z. *Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign*, 2011: 10.
Available at: <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf>
15. Boucher, C., Altamimi, Z. and Duhem, L. ITRF 91 and its associated velocity field. *IERS Technical Note 12*, Paris: Central Bureau of IERS – Observatoire de Paris, 1992: 143.
16. Boucher, C., Altamimi, Z. and Sillard, P. The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF97). *IERS Technical Note 27*, Paris: Central Bureau of IERS – Observatoire de Paris, 1999: 192.
17. Braasch, M., 1996: Multipath Effects. *Parkinson, Spilker (eds.)* 1: 547–568.
18. Bruyninx, C., Altamimi, Z., Caporali, A. et al. *Guidelines for EUREF Densifications*, EUREF, 2013: 9.
Available at:
ftp://epncb.oma.be/pub/general/Guidelines_for_EUREF_Densifications.pdf
19. CODE data – available at: <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE>
20. Dach, R., Andritsch, F., Arnold, D. et al. *User manual of the Bernese GNSS Software Version 5.2*, Astronomical Institute, University of Bern, 2015: 852.
21. Doan, M.-L. and Brodsky, E. E. *Tidal analysis of water level in continental boreholes, version 2.2*, Santa Cruz: University of California, 2006: 60.
22. Einstein, N. *Map of the Baltic Sea*, 2006.
Available at: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Baltic_Sea_map.png
23. Ekman, M. *The Changing Level of the Baltic Sea during 300 Years: A Clue to Understanding the Earth*, Åland Islands: Summer Institute for Historical Geophysics, 2009: 155.
24. Ekman, M., 1998. Secular change of the seasonal sea level variation in the Baltic Sea and secular change of the winter climate. *Geophysica* 34 (3): 131–140.
25. Ekman, M., 1996. A consistent map of the postglacial uplift of Fennoscandia. *Terra Nova* 8(2): 158-165.
26. Elken, J. and Matthäus, W., 2008. Annex A: physical system description. *The BALTEX Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*, Springer-Verlag: 379–398.
27. EPN Coordination Group and the EPN Central Bureau. *Guidelines for the EPN Analysis Centres*, EPN Guidelines, 2013: 8.
Available at: <http://www.epncb.oma.be/documentation/guidelines/>
28. EUPOS[®] home page. Available at: <http://www.eupos.org/>
29. EUPOS[®] ISC. *EUPOS Technical Standards: Revised 3rd Edition*, Resolution 23.2, Tbilisi, Georgia, 7–8 May 2013: 17.
30. EUPOS[®]-Riga home page.
Available at: <http://www.rdpad.lv/geotelpiska-informacija/eupos-riga/>
31. EUREF. *Terms of Reference*, EUREF 2008 Symposium: Brussels, Belgium, 18–21 June 2008: 3.
32. EPN home page. Available at: <http://epncb.oma.be/>

33. Fosu, C., 1998. Astrogeodetic Levelling by the Combination of GPS and CCD Zenith Camera. Studiengang Vermessungswesen, Schriftenreihe UniBw München 62.
34. Gregorius, T. *GIPSY-OASIS II: How it works*, Pasadena: California Institute of Technology, NASA Jet Propulsion Laboratory, 1996.
35. Grewal, M. S., Weill, L. R. and Andrews, A. P. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration, 2nd Edition*, Wiley, New York, 2007: 525.
36. Haritonova, D., 2016. Sea level variations at the Latvian coastal hydrologic stations. *Geodesy and Cartography* 42 (2): 31–38.
37. Haritonova, D. Earth tide observations and analysis methods. *73rd Annual Scientific Conference of the University of Latvia*, Section: The Project “FOTONIKA-LV – FP7-REGPOT-CT-2011-285912” – the third year scientific outcomes, 6 February 2015, Riga: poster.
Available at: <https://ortus.rtu.lv/science/lv/publications/20130>
38. Haritonova, D. GNSS station kinematic coordinate analysis. *71st annual scientific conference of University of Latvia*, Natural sciences photonics, 1 February 2013, Riga: abstract.
Available at: <https://ortus.rtu.lv/science/lv/publications/16131>
39. Haritonova, D. (a). GNSS station kinematic coordinate analysis. *Riga Technical University 53rd International Scientific Conference*, dedicated to the 150th Anniversary, the 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute / RTU Alumni, 11–12 October 2012, Riga: abstract.
Available at: <https://ortus.rtu.lv/science/lv/publications/16138>
40. Haritonova, D. (b). The impact of solid Earth tides on the DGNSS positioning results. *United Nations / Latvia Workshop on the Applications of Global Navigation Satellite Systems*, 14–18 May 2012, Riga: presentation.
Available at:
<http://www.unoosa.org/documents/pdf/psa/activities/2012/un-latvia/ppt/2-11.pdf>
41. Haritonova, D., 2012c. Solid Earth tides in the territory of Latvia. *RTU Scientific Proceedings “GEOMĀTIKA”*, Riga: 5 pages.
42. Haritonova, D. and Balodis, J., 2012. History of tidal effect observations [in Latvian]. In: *53. RTU Studentu zinātniskās un tehniskās konferences materiāli*: 169–170.
Available at: <https://ortus.rtu.lv/science/en/publications/18174>
43. Haritonova, D., Balodis, J., Janpaule, I., Jumare, I. and Normand, M. (a). Earth’s surface movements in Latvia. *72nd annual scientific conference of University of Latvia*, Section: The Project “FOTONIKA-LV – FP7-REGPOT-CT-2011-285912” – the second year scientific outcomes, 7 February 2014, Riga: poster.
Available at:
<http://publikacijas.lu.lv/zinatniskie-instituti/lu-geodezijas-un-geoinformatikas-instituts/earths-surface-movements-latvia/>

44. Haritonova, D., Balodis, J., Janpaule, I. and Morozova, K., 2015a. Earth's surface displacements from the GPS time series. *Proc. of the 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 96: 10 pages.
45. Haritonova, D., Balodis, J., Janpaule, I. and Normand, M., 2013a. Displacements at the GNSS stations. *Proc. of 4th International Scientific Conference "Civil Engineering'13"*, Latvia University of Agriculture: 5 pages.
46. Haritonova, D., Balodis, J., Janpaule, I. and Normand, M. (b). GNSS station displacement analysis. *EGU General Assembly, 7–12 April 2013, Vienna*: poster.
Available at: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2013/posters/11671>
47. Haritonova, D., Balodis, J., Zarins, A. and Rubans, A. High precision techniques for Earth's crust movement observations in Latvia. *EUREF Symposium, 25–27 May 2016, Donostia – San Sebastian*: poster.
Available at:
<http://euref.eu/symposia/2016SanSebastian/p-03-01-Haritonova.pdf>
48. Haritonova, D., Balodis, J., Zarins, A., Rubans, A. and Janpaule, I. (b). Application of GNSS observation results to determination of the ground deformations. *EUREF Symposium, 3–7 June 2014, Vilnius*: abstract.
Available at: http://www.nzt.lt/euref2014/Abstracts_book.pdf
49. Haritonova, D., Janpaule, I., Rubans, A. and Zarins, A., 2015b. Project of multi-purpose optical tracking system. *EGU General Assembly, 12–17 April 2015, Vienna*: poster.
Available at:
http://presentations.copernicus.org/EGU2015-14980_presentation.pdf
50. Haritonova, D., Kaminskis, J. and Lasmane, I. (c). Analysis of kinematic coordinates from GNSS stations in Latvia. *NKG Science Week, 12–14 March 2013, Reykjavik*: presentation.
Available at: <https://ortus.rtu.lv/science/lv/publications/22473>
51. Haritonova, D., Zarins, A., Rubans, A. and Janpaule, I. (c). Project of multi-purpose optical tracking system: design and deformations of optical system's transmitting path. *1st International Conference "Nocturnal Atmosphere, Remote Sensing and Laser Ranging: NOCTURNAL – Riga 2014"*, 16–22 October 2014, Riga: poster.
Available at: <https://ortus.rtu.lv/science/lv/publications/18936>
52. Hirt, C., 2001. Automatic determination of vertical deflections in real-time by combining GPS and digital zenith camera for solving the "GPS-height-problem". *Proc. of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Lake City*: 2540–2551.
53. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Wasle, E. *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*, SpringerWienNewYork, 2008: 516.

54. IGS data – available at: <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/product>
55. ILRS / Technology / Modeling [online], [cited November 2015].
Available at: <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/technology/modeling/index.html>
56. Janpaule, I., Haritonova, D., Balodis, J., Zarins, A., Silabriedis, G. and Kaminskis, J., 2015. Improvement of Latvian geoid model using GNSS/levelling, GOCE data and vertical deflection measurements. *Proc. of 5th International GOCE User Workshop*, ESA SP-728: 4 pages.
57. Jenkins, G. M. and Watts, D. G. *Spectral analysis and its applications*, Holden-Day, 1968: 525.
58. Jivall, L., 2014. The Maintenance of SWEREF99, including the use of a deformation model. *EUREF Symposium*, 3–7 June 2014, Vilnius: presentation.
Available at:
<http://www.euref.eu/symposia/2014Vilnius/Symposium2014-Vilnius.html>
59. Jivall, L., Kaminskis, J. and Paršeliūnas, E., 2007. Improvement and extension of ETRS89 in Latvia and Lithuania based on the NKG 2003 GPS campaign. *Geodesy and Cartography* 33 (1): 13–20.
60. Kakkuri, J., ed. *Geodesy and geophysics* 115, Finnish Geodetic Institute, Helsinki, 1993: 200.
61. Kaminskis, J., Zarins, A., Rothacher, M., Rubans, A., Silabriedis, G., Balodis, J. and Haritonova, D. Astrometric instruments of GGI for geodetic tasks. *EUREF Symposium*, 3–5 June 2015, Leipzig: poster.
62. Kenyeres, A. EUPOS Combination centre now extended as EPN densification. *EUPOS ISC meeting*, 6–7 May 2014, Riga: presentation.
63. Kenyeres, A. Maintenance of the EPN ETRS89 coordinates. *EUREF TWG Spring Meeting*, 26–27 February 2009, Budapest: presentation.
Available at:
http://www.euref.eu/TWG/EUREF%20TWG%20minutes/49-Budapest2009/03-e-ETRSmaint_TWGrepBP.pdf
64. Kenyeres, A. and Bruyninx, C., 2009. Noise and Periodic Terms in the EPN Time Series. *Geodetic Reference Frames*, IAG Symposia 134, Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 143–148.
65. Keruss, M. and Sennikovs, J., 1999. Determination of tides in Gulf of Riga and Baltic Sea. *Proc. International Scientific Colloquium “Modelling of Material Processing”*, 28–29 May 1999, Riga.
66. Khan, S. A. *Surface deformations analyzed using GPS time series*, Thesis for PhD degree, University of Copenhagen, Niels Bohr Institute for Astronomy, Physics and Geophysics, 2005: 120.
67. Kierulf, H. P., Steffen, H., Simpson, M. J. R., Lidberg, M., Wu, P. and Wang, H., 2014. A GPS velocity field for Fennoscandia and a consistent comparison to glacial isostatic adjustment models. *J. Geophys. Res.: Solid Earth* 119 (8): 6613–6629.

68. Lambeck, K., Smither, C. and Ekman, M., 1998. Test of glacial rebound models for Fennoscandia based on instrumented sea- and lake-level records, *Geophys. J. Int.* 135 (2): 375–387.
69. LatPos home page. Available at: <http://www.latpos.lgia.gov.lv/SpiderWeb/>
70. LEGMC sea level observations are available at:
<https://www.meteo.lv/en/hidrologija-datu-pieejamiba/?nid=912>
71. LGIA home page. Available at: <http://map.lgia.gov.lv/>
72. LGIA National Geodetic Network Database is available at:
<http://geodezija.lgia.gov.lv/start.php>
73. Lidberg, M. *Motions in the Geodetic Reference Frames – GPS observations*, Technical Report No. 517, Licentiate Thesis, Chalmers University of Technology, Department of Radio and Space Science with Onsala Space Observatory, Göteborg, 2004.
74. Lidberg, M., Johansson, J. M., Scherneck, H. G. and Davis, J. L., 2007. An improved and extended GPS-derived 3-D velocity field of the glacial isostatic adjustment (GIA) in Fennoscandia, *Journal of Geodesy* 81 (3): 213–230.
75. Lisitzin, E., 1959. Uninodal seiches in the oscillation system Baltic proper – Gulf of Finland, *Tellus* 11 (4): 459–466.
76. Madsen, F. and Madsen, B., 1993. A new GPS-network in the Baltic countries. *Symp. of the IAG Subcommission for Europe (EUREF)*, 17–19 May 1993, Budapest: 83–91.
77. Matthäus, W. *The History of Investigation of Salt Water Inflows into the Baltic Sea – from the Early Beginning to Recent Results*, Marine Science Reports 65, Baltic Sea Research Institute, Warnemünde, 2006: 73.
78. Medvedsky, M. and Pap, V., 2008. The new pointing model of telescope based on tracking data. *Proc. of the 16th International Workshop on Laser Ranging*, 12–17 October 2008, Poznan: 483–488.
79. Medvedsky, M. and Suberlak, V., 2002. Mount errors model for the Kyiv SLR station. *Artificial Satellites* 37: 3–16.
80. Meier, H. E. M., 2006. Baltic Sea climate in the late twenty-first century: a dynamical downscaling approach using two global models and two emission scenarios. *Climate Dynamics* 27 (1): 39–68.
81. Milne, G. A., Davis, J. L., Mitrovica, J. X., Scherneck, H.-G., Johansson, J. M., Vermeer, M. and Koivula, H., 2001. Space-geodetic constraints on glacial isostatic adjustments in Fennoscandia. *Science* 291 (5512): 2381–2385.
82. Nordman, M. *Improving GPS time series for geodynamic studies*, Thesis for PhD degree, Finnish Geodetic Institute, Kirkkonummi, 2010: 59.
83. Nordman, M., Poutanen, M., Kairus, A. and Virtanen, J., 2014. Using the Nordic Geodetic Observing System for land uplift studies. *Solid Earth* 5 (2): 673–681.
84. Nordman, M., Virtanen, H., Nyberg, S. and Mäkinen, J., 2015. Non-tidal loading by the Baltic Sea: Comparison of modelled deformation with GNSS time series. *GeoResJ* 7: 14–21.

85. Ocean tide loading provider. Available at: <http://holt.oso.chalmers.se/loading>
86. Omstedt, A., Elken, J., Lehmann, A., Leppäranta, M., Meier, H. E. M., Myrberg, K. and Rutgersson, A., 2014. Progress in physical oceanography of the Baltic Sea during the 2003–2014 period. *Progress in Oceanography* 128: 139–171.
87. Peltier, W. R., 1994. Ice age paleotopography. *Science* 265 (5169), 195–201.
88. Petit, G. and Luzum, B. IERS Conventions (2010). *IERS Technical Note* 36, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010: 179.
89. Podobed, V. V. and Nesterov, V. V. *General Astrometry* [in Russian], Nauka, Moscow, 1975: 552.
90. Poutanen, M. and Steffen, H., 2014. Land Uplift at Kvarken Archipelago / High Coast UNESCO World Heritage area. Geophysical Society of Finland, *Geophysica* 50 (2): 49–64.
91. Rebischung, P. Upcoming switch to IGS08/igs08.atx [IGSMail-6354], 2011. Available at: <http://igsceb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2011/006346.html>
92. Rosenthal, G. European Position Determination System Status and Activities. *3rd Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems*, 8–12 December 2008, Pasadena.
93. Ruotsalainen, H., Nordman, M., Virtanen, J. and Virtanen, H., 2015. Ocean tide, Baltic Sea and atmospheric loading model tilt comparisons with interferometric geodynamic tilt observation – case study at Lohja2 geodynamic station, southern Finland. *Journal of Geodetic Science* 5 (1): 156–162.
94. Schildknecht, T., 1994. Optical astrometry of fast moving objects using CCD detectors. *Geod. Geophys. Arb. Schweiz* 49.
95. Seeber, G. *Satellite Geodesy, 2nd completely revised and extended edition*, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 2003: 589.
96. Seeber, G. *Satellite Geodesy*, de Gruyter, Berlin, 1993.
97. Spada, G. and Melini, D. *SELEN User Manual for Version 2.9*, Computational Infrastructure for Geodynamics, 2013: 60. Available at: <https://geodynamics.org/cig/software/selen>
98. Spilker, J., 1980. GPS signal structure and performance characteristics. *Navigation* 25 (2) (1978), In: *Janiczek (ed.)* (1986) 1: 29–54.
99. Steffen, H. Glacial isostatic adjustment: Introduction – Part 1. *SCAR GIA Summer School*, 13–19 September 2015, Gibraltar Island: presentation (by Whitehouse, P. and Bentley, M.).
100. Steffen, H. and Wu, P. 2011. Glacial isostatic adjustment in Fennoscandia – a review of data and modeling. *Journal of Geodynamics* 52 (3–4): 169–204.
101. Vestøl, O., 2006. Determination of postglacial land uplift in Fennoscandia from leveling, tide-gauges and continuous GPS stations using least squares collocation. *Journal of Geodesy* 80 (5): 248–258.

102. Vestøl, O., Ågren, J., Kall, T., Aleksejenko, I., Paršeliūnas, E. and Rūdja, A. A new updated empirical land uplift model. *NKG General Assembly*, 1–4 September 2014, Göteborg: presentation.
Available at:
https://www.lantmateriet.se/globalassets/kartor-och-geografisk-information/gps-och-matning/nkg2014/26_vestol_nkg-general_assembly.pdf
103. Virtanen, H. and Mäkinen, J., 2003a. The effect of the Baltic Sea level on gravity at the Metsähovi station. *Journal of Geodynamics* 35 (4–5): 553–565.
104. Wübbena, G., 1991. Zur Modellierung von GPS Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung. *Wiss. Arb. Univ. Hannover*, Nr. 168, Hannover.
105. Wübbler, Ch. and Krauss, W., 1979. The two-dimensional seiches of the Baltic Sea. *Oceanologica Acta* 2 (4): 435–446.
106. Zariņš, A., Haritonova, D., Rubans, A., Silabriedis, G. and Zvirgzds, J., 2016. Field tests of astrometric subsystem. *Geodesy and Cartography* 42 (1): 1–6.
107. Zariņš, A., Janpaule, I. and Kaminskis, J., 2014. On reference star recognition and identification. *Geodesy and Cartography* 40 (4): 143–147.
108. Zarins, A., Rubans, A., Janpaule, I., Haritonova, D., Silabriedis, G. and Barzdis, A. Project of multipurpose optical tracking device – progress report. *73rd Annual Scientific Conference of the University of Latvia*, Section: The Project “FOTONIKA-LV – FP7-REGPOT-CT-2011-285912” – the third year scientific outcomes, 6 February 2015, Riga: abstract.
Available at:
http://www.lu.lv/fileadmin/user_upload/lu_portal/projekti/fotonika-lv/book_of_abstracts_lu73.pdf
109. Zhaborovsky, V. P., Pap, V. O., Medvedsky, M. M. and Choliy, V., 2012. Error budget model for SLR station 1824 Kyiv-Golosie telescope. *Bulletin of Ukrainian Earth Orientation Parameters Laboratory* 7: 27–29.
110. Zvirgzds, J. *Rational system LatPos* [in Latvian], Thesis for PhD degree, Riga Technical University, Department of Geomatics, Riga, 2012: 264.
111. Zvirgzds, J., 2007. Geodetic measurements using GPS base station system LatPos. *Geomatics* 11, RTU, Riga: 81–89.

APSTIPRINĀJUMS / CONFIRMATION

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

I hereby declare that the Doctoral Thesis submitted for the review to Riga Technical University for the promotion to the scientific degree of Doctor of Engineering Sciences is my own. I confirm that this Thesis has not been submitted to any other university for the promotion to other scientific degree.

Diāna HARITONOVA
(paraksts / signature)

.....
(datums / date)

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā. Tajā ir anotācija, ievaddaļa, piecas nodaļas, galvenie secinājumi, divi pielikumi un izmantotās literatūras saraksts ar 111 avotiem. Darbā ir 61 attēls, 26 formulas un deviņas tabulas. Darba kopējais apjoms ir 136 lappuses.

The Doctoral Thesis has been written in English. It consists of an annotation, an introductory part, 5 chapters, main conclusions, 2 appendices, and the list of references with 111 sources. The Thesis includes 61 figure, 26 formulas, and 9 tables. The total volume of the Thesis is 136 pages.