

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Jānis KAMINSKIS

LATVIJAS ĢEOĪDA MODELIS UN TĀ ATTĪSTĪBA

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2010

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības fakultāte
Transportbūvju institūts
Ģeomātikas katedra

Jānis Kaminskis
Būvniecības doktora programmas doktorants

LATVIJAS ĢEOĪDA MODELIS UN TĀ ATTĪSTĪBA

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. phys., profesors
J.BALODIS

Rīga 2010

UDK 528.21(474.3)(043.2)

Ka 333 1

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

Satura rādītājs

| | |
|--|-----------|
| DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS..... | 4 |
| Tēmas aktualitāte | 4 |
| Promocijas darba mērķis | 4 |
| Darba uzdevumi..... | 5 |
| Darba zinātniskā novitāte | 5 |
| Darba praktiskā vērtība..... | 6 |
| Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes | 6 |
| Darba sastāvs un apjoms | 7 |
| Darba aprobācija un publikācijas | 7 |
| DARBA SATURS..... | 9 |
| Pirmā nodaļa..... | 9 |
| Otrā nodaļa | 10 |
| Trešā nodaļa..... | 11 |
| Ceturtnā nodaļa..... | 12 |
| Piektā nodaļa | 15 |
| Sestā nodaļa | 18 |
| NOBEIGUMS UN SECINĀJUMI | 21 |
| PUBLIKĀCIJAS | 27 |
| PIEDALĪŠANĀS KONFERENCĒS..... | 29 |

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Visi ģeodēziskie mērījumi ar klasiskās un arī kosmiskās ģeodēzijas metodēm tiek veikti Zemes gravitācijas lauka vidē. Nosakot ģeoīdu, aprēķinot svērteņa līnijas novirzi, reducējot ģeodēzisko mērījumu rezultātus uz kopējo koordinātu sistēmu, kā arī aprakstot Zemes mākslīgo pavadoņu (ZMP) kustību, nepieciešams precīzi zināt gravitācijas lauka parametrus. Mūsu mērķis ir telpisko mērījumu rezultātā iegūt maksimāli precīzu pozīcijas piesaisti iepriekš definētā ģeodēziskā koordinātu sistēmā, un aktuāli ir šo matemātisko saikni turpmāk saglabāt. Telpiskās trīsdimensiālās koordinātu sistēmas augstuma komponentes atskaitēi lieto digitālo līmeņvirsmu jeb *ģeoīdu*, ko izmanto visiem tālākiem praktiskiem darbiem. Tas sniedz vienotu atskaites matemātisko virsmu. Mūsdienu apstākļos pat jebkura lokālā ģeodēziskā atbalsta tīkla izveidošana dažādu tautsaimniecības uzdevumu uzmērīšanas darbiem tiek veikta, lietojot ekonomiski visizdevīgākās un operatīvi visātrākās DGPS/DGNSS metodes. Tieši tas arī pamato prasības augstas precizitātes ģeoīda modelim, lai mērījumu augstuma komponenti varētu reducēt uz tradicionāli lietoto vidējo jūras līmeņa atskaites virsmu. Jo precīzāks ģeoīda modelis ir mūsu rīcībā, jo precīzāki būs ģeodēzisko mērījumu rezultāti.

Promocijas darba tēmas vispārējā aktualitāte un izstrādātā oriģinālā modeļa praktiskā pielietojuma paplašināšanās izraisa pieaugošu kolēģu interesi un nepieciešamību pamatot paveikto izpētes darbu. Turpinoties tālākai izstrādes attīstībai tieši saistībā ar jaunāko kosmisko tehnoloģiju izmantošanu, savu nozīmi nezaudē arī tradicionālie virszemes gravimetriskie mērījumi. Tie nodrošina mērījumu pēctecību un bāzi gravimetrisko vērtību teorētiskiem pētījumiem. Šādā darbā visām izpildītajām darbībām, kas lietotas ģeodēzisko sistēmu un datu korekcijām, jābūt precīzi dokumentētām.

Promocijas darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt zinātniski pamatotu maksimāli augstas precizitātes Latvijas Republikas teritorijas gravitācijas lauka un tā anomālijas aprakstošo matemātisko modeli. Aprēķinu rezultātā noteikto Zemes formas visprecīzāk aprakstošo līmeņvirsmu – ģeoīdu – piemērot turpmākai lietošanai Latvijas teritorijā, kad tiek izpildīti dažāda veida mērniecības darbi.

Darba uzdevumi

Lai sasniegtu izvirzīto darba mērķi, ir definēti šādi darba uzdevumi:

- Izvēlēties nacionālai teritorijai piemērotāko gravitācijas lauka izstrādes teoriju un tehnoloģiju.
- Veikt iespējami izmantojamo informācijas avotu analīzi, izvērtēt papildu nepieciešamās informācijas apjomus, tās ieguves veidus un iespējas.
- Izstrādāt Latvijas Republikas ģeoīda aproksimācijas formulas un izskaitļot ģeoīda modeli.
- Veikt izstrādātā modeļa precizitātes novērtējumu un piesaisti ģeodēziskajam tīklam.

Darba zinātniskā novitāte

Darbā autors pirmoreiz izstrādājis Latvijas ģeoīda modeļa iegūšanas teorētiskās un praktiskās bāzes izveidi, kas sekmīgi realizēts promocijas darbā.

Disertanta darba rezultātā iegūtais jaunais augstuma pārrēķina ģeoīda modelis - LV'98 GPS-ģeoīds ir savienots kopējā tīklā ar kaimiņvalstīm Lietuvu un Igauniju. Neveidojas pārrāvumi uz robežām, jo tika izmantoti arī kaimiņvalstu ģeodēziskā tīkla punkti augstuma piesaistei, kā arī lietoti vienoti absolūtās gravimetrijas bāzes tīkla punkti gravimetrisko mērījumu reducēšanai. Pēc absolūtās un relatīvās gravimetrijas rezultātu apkopošanas atbilstīgi visiem pieejamajiem resursiem seko radošs modelēšanas darbs ar GRAVSOFIT programmatūru. Modelēšanas procesā atklāju, ka mums ir nepietiekams gravimetrisko punktu nosegums teritorijās Baltijas jūrā. Tad modelēšanā papildus tika izmantoti kosmiskā pavadoņa ERS-1 altimetriskie mērījumi, kas tika darīts pirmo reizi Baltijas jūras teritorijā. Tie tika iekļauti aprēķinos, kā rezultātā mūsu ģeoīda modeļa precizitāte uzlabojās par 1,3 cm.

Pēc visu dažādo gravimetrisko datu izmantošanas un to savstarpējas pārbaudes tika aprēķināts iespējami precīzākais ģeoīda modelis, kas ir savienots ar pārbaudītiem valsts augstākās klases ģeodēziskajiem punktiem. Tādējādi disertanta iegūtais modelis ne tikai kalpo kā augstuma atskaites līmeņvirsmas darbā ar DGPS/DGNSS mērinstrumentiem, bet arī sniedz precīzu novērtējumu par visas valsts ģeodēzisko tīklu veidu savstarpējo saderību un precizitāti. Tas nosaka, tieši kādos konkrētos virzienos papildus jāveic ģeodēziskie mērījumi, lai būtu iespējams iegūt vēl augstākas precizitātes ģeoīda modeli.

Promocijas darbs ir pabeigta oriģināla izstrādne, kurā aprakstītajiem rezultātiem ir būtiska nozīme būvzinātņu nozares ģeodēzijas zinātnes apakšnozarē.

Darba praktiskā vērtība

Praktiskā modeļa izstrāde veikta noslēgtam ciklam, sākot ar gravimetrisko datu apkopošanu, to ciparošanu un absolūtās gravimetriskās vērtības noteikšanu līdz pat jauna ģeoīda modeļa aprēķināšanai. Pilno aprēķinu ciklu vienmēr ir iespējams atkārtot, ja kļuvuši pieejami augstākas precizitātes ģeodēziskie dati.

Darba autors pats tieši piedalās absolūtajos, relatīvajos, kā arī aerogravimetriskos mērījumos. Izpildījis datu apstrādi un sagatavošanu modelēšanai. Strādā ar GRAVSOFTE programmu paketi, kā arī veic nepieciešamo programmēšanu. Veic plašus salīdzinājumus ar ģeodēzijā zināmākajiem ģeoīda modeļiem, izanalizē to atbilstību Latvijas teritorijai un izvērtē saskaņu ar savu izstrādāto modeli. Tādējādi izvērtē arī valsts ģeodēziskā atbalsta tīkla kvalitāti un nodrošina starptautisko datu apriti. Darbodamies starptautiskos projektos, analizē kvalitatīvu Latvijas ģeoīda modeļa risinājuma turpmāko attīstību. Tādas iespējas varētu būt, precizējot valsts ģeodēziskā atbalsta tīklu, pabeidzot nivelēšanas datu apstrādi un savienojot tos ar DGPS/DGNSS novērojumiem. Sagaidāmi turpmāki globālo gravitācijas modeļu precizējumi saistībā ar jauno kosmisko misiju rezultātiem. Taču visi tie mērījumu dati, kas iegūti ar autora izstrādāto ģeoīda modeli, ir precīzi šai sistēmā. Tie ir dokumentējami un saglabājami, lai nākotnē nodrošinātu pāreju no vienas praksē lietotās sistēmas uz citu sistēmu.

Darbā aprakstītais modelis ir sekmīgi kalpojies ikdienā Latvijā veiktajos mērniecības darbos jau 10 gadus, un to izmanto vēl joprojām. Tas norāda, ka izstrādātais modelis ir izturējies laika pārbaudī un ir ļoti vajadzīgs mērniekiem, ģeodēzistiem un zinātniekiem. Lielākie ieguvēji ir ģeodēzijas nozares speciālisti un aprēķinātā ģeoīda modeļa lietotāji.

Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes

- Paveikta Latvijas Republikas teritorijas gravitācijas lauka un tā anomālijas aprakstoša matemātiskā modeļa zinātniski pamatota izstrāde. Iegūta jauna teorija un izstrādes algoritms ģeoīda modelēšanai.
- Pirmo reizi pasaulē teritorijās bez gravimetriskiem datiem Baltijas jūrā, pielietojot ZMP altimetriskos datus, iegūts ģeoīda modeļa precizitātes uzlabojums par 1,3 cm,

kas pirmo reizi nodrošina 6 – 8 cm precizitātes gravimetriskā ģeoīda modeli ar plašu praktisko pielietojumu visā valsts teritorijā.

- Noteikta gravimetriskā atbalsta vērtība ar precizitāti 5 μ Gal trīs īpaši izvēlētās vietās un noteikta Potsdamas vērtības korekcija -14,0 mGal.
- Cīparotie gravimetriskie dati iekļauti starptautiskā datu bāzē (\approx 12 000 punkti), kas nodrošina precīza ģeoīda modeļa aprēķināšanu.

Darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbs ir patstāvīgs zinātnisks pētījums, un tas sastāv no ievada, 6 nodaļām, nobeiguma, secinājumiem un bibliogrāfijas. Darba apjoms ir 151 lappuse, 52 attēli, 7 tabulas, informācijas avotu saraksts, kas satur 112 nosaukumus un pielikumu.

Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba rezultāti ziņoti un apspriesti vairāk nekā 7 vietējās un 9 starptautiskās konferencēs. Zinātniskās izstrādes gaita, galvenie darba rezultāti izklāstīti 15 publikācijās starptautiskos žurnālos un rakstu krājumos. Darbs veikts Rīgas Tehniskās universitātes Ģeomātikas katedrā, Valsts zemes dienestā (VZD), Dānijas Nacionālajā mērniecības un kadastra centrā (KMS) un Latvijas Ģeotelpiskajā informācijas aģentūrā laika posmā no 1996. gada līdz 2010. gadam.

DARBA SATURS

Promocijas darbs ir apkopots **sešās nodaļās**, kur sākotnējās sadaļās vairāk apskatītas teorētiskas pamatnostādnes un problēmas, tālāk aprakstīti praktiski risinājumi un sasniegtais rezultāts. Darba ievadā ir parādīta problēmas nostādne, kas saistīta ar gravimetrisko datu izmantošanu, un formulēti darba mērķi, uzdevumi, zinātniskā un praktiskā nozīme.

Pirmajā nodaļā ir apskatīta ģeodēziskā atbalsta tīkla definēšanas nepieciešamība un izskaidrota šī tīkla saistība ar gravitācijas lauka novērojumiem. **Otrajā nodaļā** konceptuāli aprakstīta ģeodinamisko procesu norise un to tiešā ietekme uz vertikālo, t. i., augstuma sistēmu, kas pakļauj izmaiņām arī ģeoīda modeli. Kā uzskatāma virsma mūsu ģeoīdam kalpo Baltijas jūra, kuras stāvoklis ir laikā svārstīgs jeb mainīgs. Lai varētu definēt un izmantot augstuma sistēmu gan lokāli, gan globāli, nepieciešams viens kopējs Zemes gravitācijas modelis. Tāds globāls modelis tiek lietots promocijas darbā, kas kalpo kā universāla atskaites līmeņvirsma, un par to plašāks izklāsts ir **trešajā nodaļā**. Turpinājumā **ceturtajā nodaļā** apskatītas normālā gravitācijas lauka īpašības un matemātiskās pamatsakarības, kā arī parādītas metodes tiešai gravitācijas lauka absolūtai uzmērīšanai, kas tikusi veikta Latvijas trīs īpaši ierīkotajos absolūtos punktos. Minētie mērījumi notika vienoti visās trīs Baltijas valstīs un sniedz pamatu turpmākiem gravimetriskiem darbiem. Šo darbu izpildē nacionālā līmeņa speciālisti patstāvīgi pielieto relatīvās mērīšanas metodes. Par blīvāka sabiezinošā gravimetriskā tīkla izveidošanu un praktiskiem relatīvajiem gravimetriskajiem mērījumiem Latvijas teritorijā, kas ietver arī aerogravimetriskos mērījumus, tiek stāstīts **piektajā nodaļā**. Jaunu mērījumu gadījumā tiek noteiktas gravimetriskā lauka pārbaudes vērtības. Tad spējam objektīvi novērtēt padomju laika daudzskaitlīgos relatīvos gravimetriskos mērījumus. **Sestajā nodaļā** aprakstīts uz gravimetriskajiem mērījumiem balstītais zinātniskais rezultāts, kas tiek izmantots tālākos pētījumos un arī šīsdienas praksē. Minētais ģeoīda modelis LV'98 ir matemātiski piesaistīts Latvijas teritorijas speciāli izvēlētiem ģeodēziskajiem pamatpunktiem. Šāds gala produkts plaši tiek pielietots mērniecības darbos, kad darbus veic ar DGPS/DGNSS metodi. Šo zinātnisko mērķu sasniegšanā tika izmantota programmu pakete GRAVSOFIT.

Aprēķinātais oriģinālais ģeoīda modelis tiek pievienots promocijas darba pielikumā.

Pirmā nodaļa.

Promocijas darba pirmajā nodaļā ir aprakstīta problēmas zinātniskā nostādne, kas saistīta ar gravimetrisko datu nozīmi un pielietojumu ģeodēzijā.

Kopumā Latvijai ir pavisam seši starptautiskie ģeodēziskie bāzes punkti, no kuriem divi vēsturisku apstākļu dēļ atrodas vienuviet Rīgā. Ja salīdzina šo koordinātu sistēmas ETRS89 un iepriekšējo realizāciju, tad punktu ģeogrāfiskais izvietojums ir daudz simetriskāks nekā iepriekšējais. Sākumā Kurzemē bija tikai viens punkts – Arājs – un vēl nepastāvēja ģeodēziskais punkts Irbene Ventspils novadā. Realizējot aprakstīto promocijas darba autora punktu ģeogrāfisko plānojumu dabā, ir nodrošināta drošāka un stabilāka ģeodēziskā atskaites sistēma. Tā sniedz atskaites vērtības gan globālu, gan lokālu augstuma atskaites līmeņvirsmu kontrolei, gan situācijas piesaistei dabā.

Dzīvojot uz dinamiskas zemes, pirmais princips ir dokumentēt visu veikto novērojumu precīzu laiku. Otrkārt, visiem ģeodēziskajiem atbalsta tīkliem jāpiešķir noteikta un, vēlams, kopēja spēkā esoša atskaites epoha. Tā arī jānofiksē, kad izmanto klasiskās mērniecības metodes un notiek saslēgšanās ar tuvumā esošajām ģeodēziskajām zīmēm, kaut arī garozas deformācijas vairākumā gadījumu tektoniskās plātnes iekšienē ir neievērojamas. Taču tajā pašā laikā DGPS/DGNSS metodēm, kurās izmanto pastāvīgās bāzes stacijas vairāku 100 km attālumā, jau tuvākajā nākotnē vajadzēs lietot laikā fiksētas garozas deformācijas un augstuma atskaites virsmas – precīzus ģeoīda modeļus. Tādējādi, treškārt, jāmodelē un jākorrigē trīsdimensiju deformācijas ģeodēziskajā atbalsta tīklā. Tas šodien ir iespējams un ļoti izdevīgi, jo mums ir pieejami precīzi gravimetriskie mērījumi, kā arī vairāku desmitu gadu garumā nepārtraukti pastāvīgo GPS/GNSS staciju novērojumi. Atbilstīgi specifiskajiem iepriekš minētajiem tematiem ir izveidotas un darbojas Ziemeļvalstu ģeodēziskās komisijas (NKG) darba grupas, kurās tiek analizēta situācija un pieņemti zinātniski pamatoti lēmumi tālākam darbam.

Gravimetriskā lauka un tā ietekmes izpēte uz ģeodēziskajiem novērojumiem ir nozīmīga, lai radītu mūsdienīgu ģeodēzisko atskaites sistēmu, izveidotu ģeodēzisko un gravimetrisko tīklu, ieviestu jaunas koordinātu un ģeopotenciālo augstumu sistēmas, lai pētītu ģeofizikas problēmas, risinātu navigācijas un citus nozares uzdevumus.

Otrā nodaļa.

Zemes virsmas pacelšanās nulles vērtības izolīnija šķērso Latviju, sadalot to divās atšķirīgās daļās. Virzienā uz Latvijas ziemeļrietumiem, t. i., Kolkas raga virzienā, novērojam virskārtas pacelšanos, bet virzienā uz dienvidaustrumiem, t. i., Daugavpils pusē, notiek zemes virskārtas sēšanās. Tas notiek tādēļ, ka ledus laikmetā zem biežā ledus vairoga notika tieši pretējs process, kad šī spiediena rezultātā zemes virsma pazeminājās. Ar šīm vertikālajām garozas izmaiņām tieši saistītas ir arī ģeoīda izmaiņas, jo notiek lielu masu pārvietošanās. Ir aprēķināts, ka ģeoīda pacelšanās lielums sastāda ap 6,5% no zemes virskārtas vertikālās kustības vērtības.

Pašreiz valsts nivelēšanas tīklā iekļauti pavisam 1300 reperi. Līniju mezgla un gala punkti marķēti ar 77 fundamentāliem reperiem. Ārkārtīgi liela reperi daļa, 55%, ir sienas reperi. Saskaņā ar nivelēšanas katalogiem tilti, caurtekas un ēku pamati ar dažādu stabilitāti tika izmantoti lielākoties marķēšanai ar sienas reperiem. Līdzsvars starp reperi stabilitāti un mērījumu precizitāti ir turpmāku kritisku diskusiju temats. Iepriekš minētā nivelēšanas tīkla inspekcijas rezultātu analīze rāda, ka līdz pat 30% no kopējā reperi skaita bija iznīcināti. Salīdzinoši maz iznīcināti fundamentālie un grunts reperi, kam par iemeslu, domājams, ir to veiksmīgāka atrašanās vietas izvēle un ierīkošanas dziļums. Savukārt sienas reperi drošība ir atkarīga no ēku lietošanas mērķa. Jāatzīmē, ka nevis nivelēšanas precizitāte, bet nivelēšanas reperi stabilitāte un lielais to iznīcināto skaits ir galvenie jaunās pārnivelēšanas iemesli.

Jūras līmenis joprojām ir svarīga virsma zemes garozas deformācijas pētījumiem. Jūras līmeņa datu laika sērija dod stacijas vertikālo kustību un jūras līmeņa vispasaules mēroga celšanās summu. No jūras līmeņa laika sērijas un atkārtotas nivelēšanas var aprēķināt absolūto zemes pacelšanos, ja pievieno tādas korekcijas kā jūras līmeņa vispasaules mēroga celšanās, ģeoīda pacelšanās un jūras virsmas topogrāfijas izmaiņas. Ar absolūto zemes pacelšanos no satelītu mērījumiem un ar šķietamo zemes pacelšanos no jūras līmeņa datiem var pētīt sekulārās jūras līmeņa izmaiņas.

Gravitācijas izmaiņas un paaugstinājumu izmaiņas ir savstarpēji saistīti ģeofizikāli lielumi. Ar atkārtotiem gravitācijas mērījumiem un atkārtotu nivelēšanu var pētīt kopsakarības starp gravitācijas izmaiņām un zemes pacelšanos.

Jaunas kvalitātes atskaites sistēma gravimetriskajam tīklam sākas ar 1995. gadu, kad trīs absolūtās gravimetrijas punktus – Rīga, Pope un Višķi – uzmērīja Somijas Ģeodēzijas institūta speciālists. Tie kalpo par pamatu Latvijas valsts gravimetriskajam tīklam.

Transformāciju starp augstumu sistēmām var veikt, izmantojot labi zināmo vienādojumu:

$$h - H - N = 0 \quad , \quad (1)$$

kur h – ģeometriskais (ģeodēziskais) augstums
 H – fiziskais (absolūtais) augstums
 N – (kvazi)ģeoīda augstums.

Teorētiski augstumiem fiksētais atskaites datums ir ekvipotenciāla virsma, ko saucam par ģeoīdu. Pašreizējā posmā nav metožu, ar kurām noteikt W_0 nivelēšanas sākumpunktiem ar precizitāti, kas salīdzināma ar potenciālajām starpībām no ģeometriskās nivelēšanas. Tā kā ģeoīds nav pieejams fiziskai piekļuvei, tā vietā tiek lietots vidējais jūras līmenis (VJL) kā momentānā jūras līmeņa vidējā vērtība pietiekami ilga laika novērojumu posmā. Augstumi tiek pārnesti uz iekšzemi, izmantojot nivelēšanas tīklus, kas saslēgti ar vidējo jūras līmeni, izmantojot jūras līmeņa novērojumus.

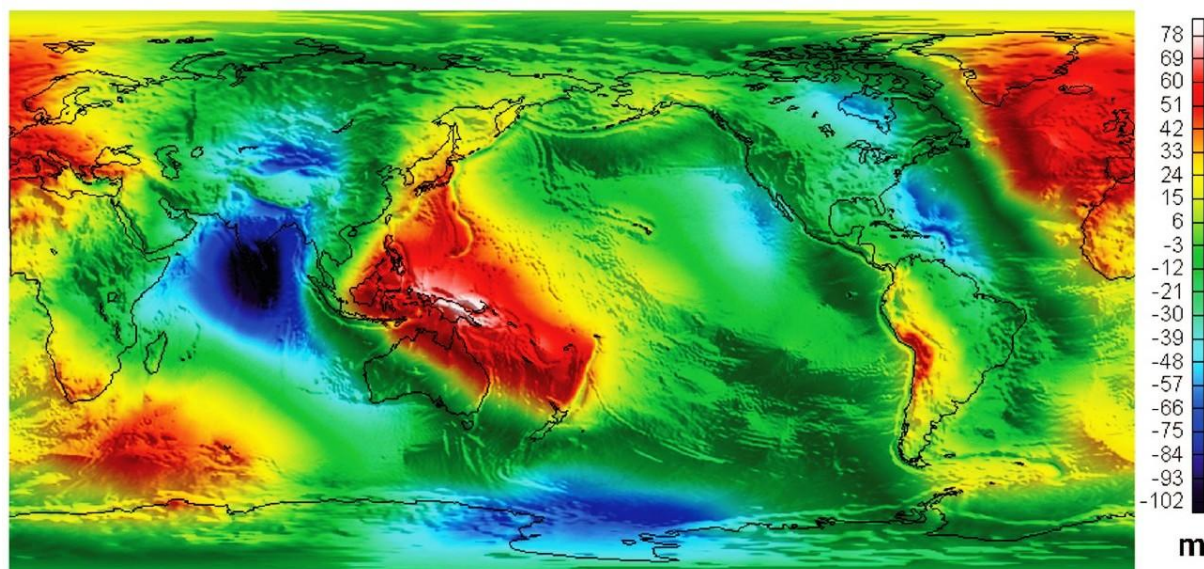
Trešā nodaļa.

Zemes ģeopotenciāla modeļu daudziem pielietojumiem gravitācijas potenciālu V izsaka ar sfērisko harmoniku paplašinājumu, kur potenciāla koeficienti šajā paplašinājumā noteikti ar dažādām tehnikām. Pēdējo 40 gadu laikā divos vispārējos veidos noticis potenciāla koeficientu novērtējuma ievērojams uzlabojums. Pirmais, augstākā pakāpe paplašinājumā ir paplašināta līdz daudz augstākai pakāpei, izmantojot papildu satelītu datus un sauszemes gravitācijas datus, līdz ar to uzlabojot modeļu izšķirtspēju. Otrais, koeficientu precizitāte nepārtraukti tiek uzlabota, izmantojot papildu datu iekļaušanu, kas laika gaitā uzlabo ģeogrāfisko pārklājumu un precizitāti.

20. gadsimta pēdējā desmitgadē vajadzība pēc uzlabotas ģeoīda undulāciju noteikšanas kļuva aizvien aktuālāka. Galvenā vajadzība saistīta ar elipsoidālo augstumu konvertēšanu no GPS noteiktajiem uz ortometriskajiem/normālajiem augstumiem. Ar ģeoīda uzlabošanu saistīts mērķis noteikt globāli definētu ģeoīdu, kas varētu veidot atskaites virsmu globālam vertikālajam datumam.

Svarīgākie virszemes gravitācijas ieguvumi iekļauj aerogravimetriskos datus virs Grenlandes, Arktikas un Antarktikas daļām, ko izmērīja ASV Jūras pētījumu laboratorija, kā arī vēl citus sadarbības projektu ietvaros iegūtos datus. Šie apkopošanas pasākumi ir

uzlabojuši un sabiezinājuši datus par daudziem pasaules sauszemes rajoniem. Šo ievērojamo ģeogrāfisko reģionu vidū ir Aļaska, Kanāda, Dienvidamerikas un Āfrikas daļas, Dienvidaustrumāzija, Austrumeiropa un bijusī Padomju Savienība. Kopumā Eiropā izmantoto gravitācijas punktu blīvums ir pietiekams 30'x30' vidējo brīvā gaisa anomāliju iegūšanai.



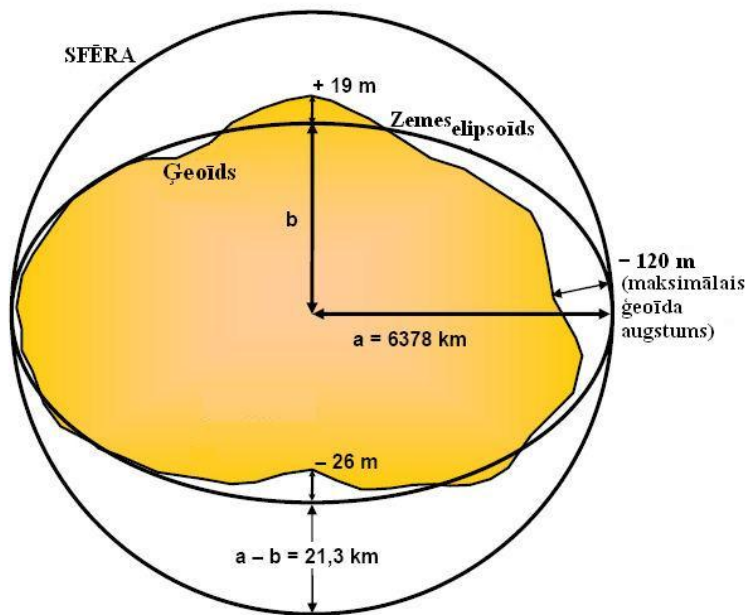
1. att. Zemes ģeoīda modelis EGM96, robežās no +85m līdz -107m

Lai arī līdz ar modeļa EGM96 izstrādni ir sasniegts ievērojams pagrieziens, tāpat turpinās darbi, lai uzlabotu modeli gan specializētiem, gan vispārējiem pielietojumiem. Izvērtējot kosmiskās CHAMP, GRACE un GOCE gravitācijas lauka izpētes misijas, jāuzlabo arī okeāna ģeoīda modelēšana, lai pilnīgāk izmantotu sinoptiskā TOPEX/POSEIDON altimetrijā sasniegto 3-4 cm precizitāti. Tādējādi turpinām pilnveidot izpratni par okeānu cirkulāciju un jaunajiem ģeopotenciāla modeļa efektiem laikā.

Ceturtnā nodaļa.

Pētot zemes gravitācijas lauku, vispirms jāizvēlas tam atbilstošākais matemātiskais modelis – zemes normālais gravitācijas lauks, kuru rada izvēlētais ekvipotenciālais elipsoīds. Šis matemātiskais elipsoīds tiek lietots arī Zemes formas aprakstīšanai. Normālais Zemes gravitācijas lauks ir ievērojami vienkāršāks par reālo, tā ekvipotenciālās virsmas un spēku līnijas var izmantot Zemes virsmas punktu stāvokļu noteikšanai. Normālo gravitācijas lauku apraksta ar normālo gravitācijas potenciālu. Bet starpību starp reālo Zemes gravitācijas lauku

un normālo lauku izsaka perturbētais potenciāls. Mēs novērojam lielas atšķirības starp izraudzīto ekvipotenciālo rotācijas elipsoīdu un sfēru.



2. att. Zemes forma kā sfēra, elipsoīds vai ģeoīds

Normālo gravitāciju uz elipsoīda virsmas γ_0 izsaka ar K.Somiljana (*Somigliana*) formulu:

$$\gamma_0 = \frac{a\gamma_e \cos^2 B + b\gamma_p \sin^2 B}{\sqrt{a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B}}, \quad (2)$$

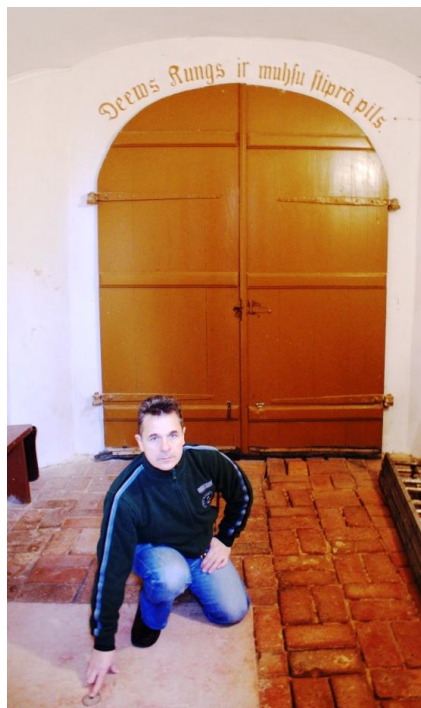
kur γ_e un γ_p – atbilstīgi ir normālā gravitācija uz elipsoīda ekvatora un tā poliem,
 B – ģeodēziskais platumš.

Mūsdienu absolūtie smaguma spēka paātrinājuma mērījumi izejas gravimetriskajos punktos, kurus saucam par nulltās klases punktiem, tiek veikti ar dažu mikrogalu precizitāti. Mūsdienās tik lielu precizitāti var sasniegt ar speciālām ballistiskajām iekārtām. Nepieciešams, lai absolūtie smaguma spēka mērījumi gravimetriskajos nulltās klases punktos periodiski tiktu atkārtoti. Ieteicamais periods starp atkārtotajiem mērījumiem ir robeža no 5 līdz 10 gadiem. Gravimetrisko nulltās klases punktu atrašanās vietai un tā iekārtojumam izvirzāmas daudzas īpašas prasības. Punkti jāierīko no ģeoloģiskā viedokļa stabilās vietās, kur gruntsūdens līmeņa svārstības ir minimālas. Vēlams, lai pie gravimetriskajiem punktiem tiktu ierīkoti urbini gruntsūdens līmeņa mērījumiem.

1995. g. gravimetrisko mērījumu datu redukcija

| Gravimetriskais punkts | g_h , μGal | W_{zz} , μGal/m | Δg_0 , μGal | g_0^{95} , μGal |
|------------------------|-----------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| RĪGA | 981650943.3 | -210.6 | 175.6 | 981651119.0 |
| POPE | 981667249.9 | -317.7 | 267.2 | 981667517.1 |
| VIŠĶI | 981567863.7 | -313.2 | 261.2 | 981568124.9 |

Vērtīgs absolūtais gravimetriskais punkts ir ierīkots Popes evaņģēliski luteriskās baznīcas priekšelpā. Tas ir izbūvēts morēnas augsnē 2 metru dziļumā ar tajā iestrādātu dzelzs armatūru. Šīs balsta konstrukcijas kopējais betona tilpums sastāda 3,2 m³. Tas ir vienīgais Baltijas valstīs tieši baznīcā izbūvētais absolūtais gravimetriskais punkts. Šādu darbu pamatā bija apsvērums, lai punkts būtu aizsargāts un saglabātos pēc iespējas ilgāku laiku. Šīs vietas izvēlē, punkta ierīkošanas darbos un novērojumos piedalījās arī darba autors. Gravimetriskā balsta ārējais skats ar iebetonētu ģeodēzisko čuguna marku tā centrā parādīts 3. attēlā.



3. att. Popes gravimetriskā punkta balsts ar marku un darba autors

Piektā nodaļa.

Pēc Dānijas – Baltijas sektora programmas ģeodēzijā noslēguma 1999. gadā tika pieņemti lēmumi par Latvijas valsts ģeodēziskā tīkla attīstību kopumā, kā arī par valsts gravimetriskā tīkla atjaunošanu. Sākotnēji jau sektora programmas realizācijas laikā tika izveidota trīs Baltijas valstu telpā vienota pamatne gravimetriskā tīkla atjaunošanai. Šis darbs ir ļoti laika ietilpīgs un prasa rūpīgu darbu. Pirms tam bija uzmērīti katrā valstī pa trim absolūtiem gravimetriskiem punktiem, kas kalpoja kā bāze turpmākiem relatīvajiem mērījumiem.

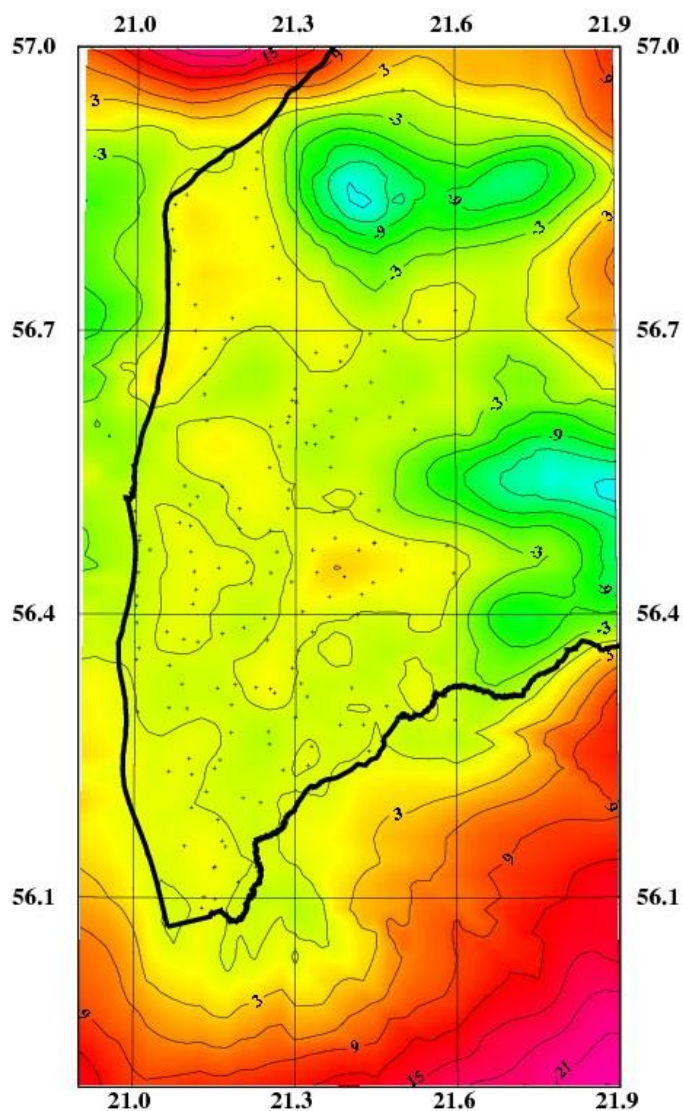
Svarīgi, lai pie pirmās klases punktiem būtu ērti piebraukt, tie būtu aizsargāti, ilgstoši izmantojami, kā arī būtu labi mērīšanas apstākļi. Izvēloties vietas, tiek ņemta vērā pastāvošā konkrētās vietas infrastruktūra un turpmākās attīstības tendences. Novērojumu izpildei ir nepieciešama stabila, horizontāla virsma, kā arī jaunu gravimetrisko punktu vietas tiek saskaņotas ar esošajiem un projektējamiem valsts ģeodēziskajiem tīkliem. Punktu vietas tiek izraudzītas tā, lai punktā tiktu izmērīts ne tikai smaguma spēka paātrinājums, bet punkts tiktu arī iekļauts valsts augstuma tīklā vai tiešā tā tuvumā būtu augstuma atzīme. Gravimetriskā atbalsta tīkla punktiem ir jābūt vienmērīgi izvietotiem, nokļājot visu valsts teritoriju.

Pēc Dānijas-Baltijas valstu sektora programmas noslēguma, kuras laikā tika pārbaudīta arī nocīparoto gravimetrisko datu atbilstība uz sauszemes, tāpat aktuāls bija jautājums par reālu mērījumu datu iegūvi Baltijas jūrā. Kaut gan jau uz to brīdi bija pieejama informācija par gravimetriskajām anomālijām, kas bija noteiktas no ZMP ERS-1 altimetriskajiem mērījumiem, tomēr Ziemeļvalstu ģeodēziskā komisija nolēma realizēt aerogravimetrisko mērījumu projektu, kurā piedalās visas Ziemeļvalstis un līdzdarbojas trīs Baltijas valstis, galvenokārt veicot organizatoriskos darbus, piemēram, saskaņojot ar valstu atbildīgajiem dienestiem lidošanas atļaujas. Tika izstrādāti lidošanas maršruti, tie savstarpēji saskaņoti. Kā vienīgā lidosta Baltijas valstīs tika izvēlēta Liepāja, kurā mērījumu laikā tika veikta arī nosēšanās un lidmašīnas borta gravimetra piesaiste valsts tīklam. Latvijas pusē to nodrošināja darba autors ar sektora programmas ietvaros iegādāto relatīvo gravimetru CG-3. Par izejas punktu piesaistei tika izmantots atjaunotā pamattīkla un padomju laika absolūtais gravimetriskais punkts Liepājas centrā bijušās sanatorijas kurtuves telpās.

Pieejamo gravimetrisko karšu lapu mēroga 1:200 000 digitizēšanas jeb to cīparošanas procesā bija jāaskaras ar ļoti dažādu informācijas daudzuma klāstu. Katrai atsevišķai kartes lapai pieejamais informācijas slāņu daudzums bija visai atšķirīgs. Par daudzām teritorijām bija pieejamas tikai un vienīgi viena veida gravimetriskās anomālijas, t. i., piemēram, Bugē

anomālijas, kā arī vēl zināma gravimetriskā atskaites sistēma un anomāliju aprēķiniem izmantotais zemes virskārtas blīvums. Šāda situācija bija vērojama visā Kurzemes teritorijā, kur gravimetriskie mērījumi bija izpildīti pagājušā gadsimta sešdesmitajos gados, kad tika lietota zemes virskārtas vidējā blīvuma vērtība $2,3 \text{ g cm}^{-3}$. Savukārt jaunākie mērījumi Latvijas teritorijai bija pieejami no pagājušā gadsimta astoņdesmitajiem gadiem, kad jau tika lietota zemes virskārtas vidējā blīvuma vērtība $2,67 \text{ g cm}^{-3}$, ievērojot visas pašreizējā starptautiskā gravimetriskā standarta tīkla IGSN1971 noteiktās vērtības.

Gravimetriskās kartes precizitātes novērtēšanai no kartes noteiktas Bugē anomālijas, izmantojot iepriekš dotās redukcijas formulas, aprēķināts smaguma spēka paātrinājums g_{71} . Īpaši izraudzīts pārbaudes apgabals ir Liepājas rajons, kurā tika ar relatīvajiem gravimetriem uzņēmēti 171 ģeodēziskais punkts. Lielākās starpības starp aprēķinātajām un izmērītajām smaguma spēka paātrinājuma vērtībām svārstās robežās no $+1,5 \text{ mGal}$ un līdz $-1,5 \text{ mGal}$, kur vidējā vērtība ir praktiski tuvu $0,0 \text{ mGal}$, kā tas parādīts nākamajā attēlā.



4. att. Bugē anomāliju starpības Liepājas rajonā, k.i. 3 mGal

Lai pieņemtu jaunu Latvijas augstumu sistēmu, t. sk. ģeoīda modeli, jāizmanto pieejamie darbu rezultāti, kas tika iegūti vairākos iepriekšējos starptautiskajos projektos, kā, piemēram, „Eiropas vienotais vertikālais tīkls” (EUVN) un „Baltijas jūras līmenis” (BSL). Šajās starptautiskajās iniciatīvās aktīvi iesaistījušies arī Latvijas ģeodēzisti. Tādējādi iegūstam fundamentālas zināšanas par Baltijas jūras virsmas, Baltijas reģiona ģeoīda, ģeodinamisko procesu, GPS/GNSS metodes izmantošanas iespējām.

Pēc mērījumu rezultātu matemātiskās apstrādes pabeigšanas iegūtas EUVN tīkla punktu ETRS 89 sistēmas ģeodēziskās koordinātas un normālie augstumi, kas saistīti ar Eiropas vienoto nivelēšanas tīklu UELN95/98 un Amsterdamas nulles punktu, t. i., Eiropas atbalsta augstumu sistēmu EVRS (*European Vertical Reference System*). Tas rada

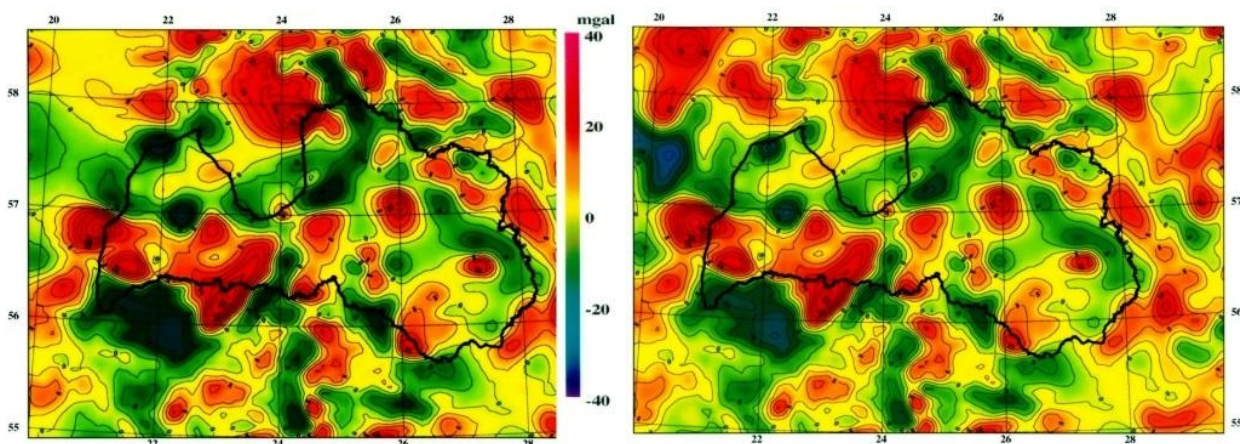
priekšnosacījumus, lai varētu pieņemt jaunu Latvijas valsts augstumu sistēmu. GPS stacijas RIGA, IRBENE un viss LatPOS tīkls, kas pieder pie Eiropas ģeodēziskajiem tīkliem, kļuviši par Latvijas augstākās precizitātes ģeodēziskajiem punktiem.

Turpmāk ar mērķi palielināt (kvazi)ģeoīda augstumu noteikšanas precizitāti, nepieciešams pabeigt jau iesākto Latvijas teritorijas vertikālo un gravimetrisko tīklu izveidošanu, sasaistot to ar GPS/GNSS atbalsta punktiem.

Sestā nodaļa.

Valsts GPS tīkls, kas aptver vairākus tūkstošus punktu, ir pabeigts, un notiek intensīva šī tīkla sabiezināšana, katru gadu papildus nosakot tūkstošiem punktu koordinātu, aktualizējas augstuma virs jūras līmeņa aprēķināšanas metode pēc noteiktajiem elipsoīda augstumiem. Aprēķinot ar GPS/GNSS mērījumiem izmērīta punkta augstumu, vajadzīgs viens papildu parametrs – ģeoīda augstums, kuru nosaka, izmantojot digitālo ģeoīda modeli. Iegūto rezultātu nosaka izmantojamā digitālā ģeoīda modeļa precizitāte. Tā kļūdas lielumi un to sadalījums ir atkarīgs no izmantotās ģeodēziskās informācijas daudzuma un precizitātes.

Darba zinātniskā novitāte ir gravimetrisko anomāliju noteikšana Baltijas jūras teritorijai no altimetrisko ZMP mērījumu rezultātiem. Gravimetrisko datu modelēšanas procesos tiek analizēti visi pieejamie gravimetriskie mērījumi. Baltijas jūrā plašos apgabalos nebija zināmi gravimetriskie mērījumi. Tādēļ, lai aizpildītu šos baltos plankumus, tika izmantotas no altimetriskiem datiem noteiktas un atbilstoši sagatavotas brīva gaisa gravimetriskās anomālijas. Attēlojot gravimetrisko lauku bez un ar jaunajām gravimetriskajām anomālijām, uzreiz pamanām atšķirības, ko redzam nākamajā attēlā.



5. att. Brīva gaisa gravimetriskās anomālijas; k. i. 4 mGal

Uzmanība jāpievērš attēlu kreisajai malai, t. i., teritorijai Baltijas jūrā. Kreisajā malā esošajam attēlam minētajā teritorijā gravimetriskā lauka virsma ir nedabīgi vienmērīga. Tas jau norāda uz gravimetriskā lauka ģeofizikālu pretrunu un neatbilstību situācijai dabā. Šis papildus veiktais darbs sniedza ģeoīda modeļa precizitātes pieaugumu par 1,3 cm.

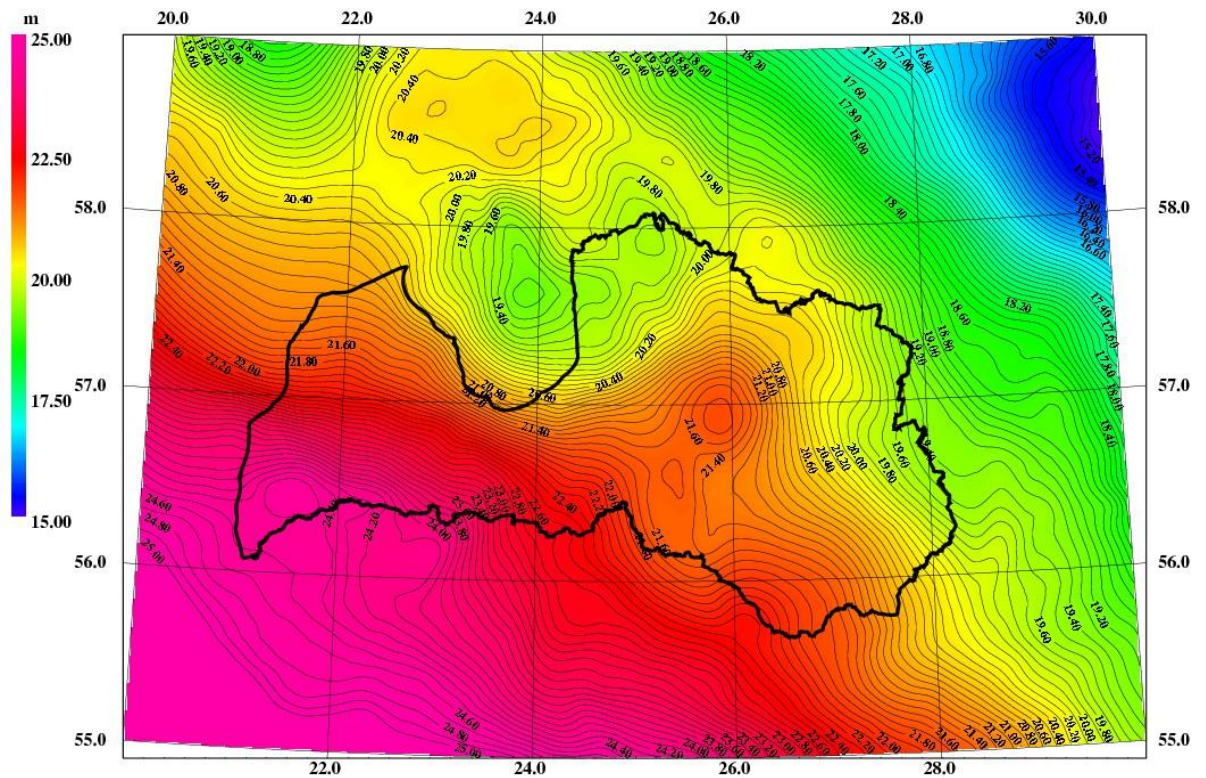
Latvijas ģeoīda modeļa aprēķini izpildīti, ievērojot šādu loģisko secību:

- modeļa aptvertajā platībā atrastas starpības pēc EGM96 modeļa aprēķinātajām un pēc lauka mērījumu rezultātiem noteiktām brīvā gaisa anomālijām;
- iegūtās brīvā gaisā anomāliju starpības pārveidotas regulāra tīkla datu veidā;
- pamatojoties uz šiem jaunajiem tīkla datiem, pēc Stoksa formulas aprēķina katrai vietai atbilstīgās pasaules ģeoīda modeļa augstuma korekciju vērtības;
- pēc pasaules ģeoīda modeļa un ģeoīda augstuma korekciju lielumu sasummēšanas aprēķināmajā modelēšanas apgabalā tiek izveidots precizētais gravimetriskais ģeoīda modelis;
- noslēgumā aprēķinātais gravimetriskais ģeoīda modelis, izmantojot punktu augstumus, kuru koordinātas noteiktas arī GPS mērījumos, tiek transformēts uz valsts pieņemto augstumu sistēmu. Tādējādi tiek noslēgts aprēķināšanas cikls ar kādu konkrētu GPS-ģeoīda modeli, piemēram, LV'98.

Ģeoīda noteikšanai lieto Stoksa formulu, kas sasaista ģeoīda augstumu N ar gravitācijas anomālijām Δg caur virsmas integrāli šādi:

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} \Delta g S(\psi) d\sigma, \quad (3)$$

kur ψ – sfēriskais attālums un S – Stoksa funkcija.



6. att. Aprēķinātā LV'98 ģeoīda modeļa augstumi virs GRS 80 elipsoīda; k. i. 10 cm

1998. gadā aprēķinātā valsts teritoriju aptverošā digitālā ģeoīda modeļa precizitātes raksturojums izveidots, kombinējot alternatīvos valsts GPS tīkla punktu koordinātas un nivelēšanas punktu augstumus. Alternatīvie aprēķinu rezultāti sniedz neatkarīgu precizitātes novērtējumu gravimetriskā ceļā iegūtajam ģeoīda modelim. Šī modeļa vidējā kvadrātiskā kļūda valsts teritorijā nepārsniedz 6 cm.

Ģeoīda augstumi Latvijas teritorijā mainās no 25,4 m Liepājas rajonā Lietuvas pierobežā pie Baltijas jūras līdz 19,3 m Balvu rajonā pašā Krievijas pierobežā. Maksimālais ģeoīda augstuma izmaiņas gradients abu minēto vietu savienojošās līnijas virzienā sasniedz 20 mm/km. Citos virzienos šis gradients būs mazāks. Latvijas teritorijā straujākās ģeoīda vērtību izmaiņas novērojamas Kurzemē, nevis pārējā valsts teritorijā, kaut citviet virsmas reljefs ir izteiktāks un sasniedz maksimālo augstuma vērtību Gaiziņkalnā.

Izveidot precizitātes ziņā nākamā līmeņa Latvijas teritorijas digitālo ģeoīda modeli būs iespējams tikai pēc jauno gravimetrisko mērījumu un valsts vertikālā ģeodēziskā tīkla atjaunošanas darbu pabeigšanas.

NOBEIGUMS UN SECINĀJUMI

- Promocijas darbā izvirzītais mērķis ir sasniegts.

Darba izpildes gaitā ir veikta Latvijas Republikas teritorijas gravitācijas lauka un tā anomāliju matemātiskā modelēšana. Aprēķinu rezultātā noteikta Zemes fiziskās virsmas aprakstošā matemātiskā forma – ģeoīda modelis – Latvijas teritorijā, kuram esmu piešķīris apzīmējumu **LV'98**. Tas ieviests praktiskā lietošanā darbā ar DGPS/DGNSS instrumentiem.

- Modernas augstuma atskaites sistēmas pielietojuma būtība un nepieciešamība.

Smaguma spēka lauka precīza informācija nepieciešama augstuma atskaites sistēmas mūsdienīgai nodrošināšanai valstī, jo īpaši izpildot ģeodēziskos mērījumus ar GPS/GNSS uztvērējiem. Minētie uztvērēji izmēra trīs Dekarta telpas koordinātas un nodrošina augstumu virs matemātiskas elipsoīda virsmas, bet nevis izmēra augstumu attiecībā pret jūras līmeni. Lai noteiktu augstumu virs jūras līmeņa, tad nepieciešams zināt ģeoīda modeļa vērtību katrā atbilstīgajā mērījumu punktā. Jo precīzāks ir ģeoīda modelis, jo precīzāk mēs varēsim noteikt augstumu virs jūras līmeņa, ja darbam lietojam GPS/GNSS uztvērējus. Jo iegūtie mērījumu rezultāti ir precīzāki, jo to pielietojums paplašinās, un ieguvums ir ne tikai ekonomiskas dabas, bet arī ļoti praktisks un atvieglo ģeodēziskos darbus kopumā. Piemēram, ja ir ļoti precīzs ģeoīda modelis, tad varam aizstāt precīzo ģeometrisko nivelēšanu, kas ir dārga un laikietilpīga, ar DGPS/DGNSS metodi augstuma pārvešanā.

- Modelēšanai nepieciešamo datu nodrošināšana ārpus modelēšanas teritorijas robežām un Baltijas jūrā. Datu apmaiņa.

Būtiski ir nodrošināt gravimetriskos datus gan modelēšanas teritorijā, gan arī vēl ārpus tās robežām. Nav nekādu sadarbības problēmu par datu apmaiņu ar Lietuvu un Igauniju. Tur dati ir savstarpēji pieejami un labi izmantojami aprēķinos. Nepieciešams blīvāks gravimetrisko datu noklājums par Baltkrievijas un Krievijas teritorijām, kā arī par teritoriju Baltijas jūrā. Problēmas risināšanas gaitā nonācu pie atziņas, ka šo datu iztrūkums ir jākompensē ar **ZMP altimetriskajiem datiem Baltijas jūrā**. Tas bija ļoti novatorisks un sekmīgs mēģinājums, kad teritorija ieguva gravimetrisko vērtību noklājumu pēc ZMP ERS-1 altimetriskajiem mērījumiem. Altimetrijas mērījumu sasaisti ar pieejamiem gravimetriskajiem datiem veicu ar GRAVSOFTE programmām. Turpmākā modelēšanas procesā konstatēju, ka ERS-1 datu izmantošana sniedz Latvijas ģeoīda precizitātes uzlabojumu par 1,3 cm.

Apgalvoju, ka šis ir pirmais sekmīgais altimetrijas rezultātu pielietošanas gadījums pasaulē lokālu ģeoīdu modeļu aprēķināšanā. Minētie rezultāti ir analizēti atsevišķās autora publikācijās.

- Savietoto speciālo ģeodēzisko punktu atlase un sasniedzamā ģeoīda modeļa precizitātes novērtējums.

Pirms sākam izmantot aprēķināto jauno ģeoīda modeli praktiskā darbā, tad ir jāpārbauda un jānodrošina modeļa atbilstība vietējai valsts augstumu sistēmai. Šeit visa atbildība un noteicošā loma ir valsts ģeodēziskajam atbalsta tīklam. Kā izejas atbalsta punkti sākumā tiek ņemti nulltās un pirmās klases ģeodēziskā tīkla punkti visā valsts teritorijā. Tiem vienlaicīgi ir jābūt sasaistītiem ar valsts augstuma tīklu. Teritoriālajam nokļūjumam jābūt maksimāli viendabīgam. Izvēlētie punkti nedrīkst saturēt ne GPS mērījumu, ne arī nivelēšanas kļūdas, jo tad tas viss tiek iestrādāts augstuma atskaites modelī. Speciālo **savietoto DGPS/DGNSS un nivelēšanas punktu atlasē** ir jāņem vērā šo vērtību iegūšanas ticamība, veicot salīdzināšanu gan ar ģeoīda modeli, gan ar tuvumā esošajiem ģeodēziskajiem punktiem. Rezultātā pēc ģeoīda modeļa piesaistes izpildes tas vairs nav īsts ģeoīds, nedz arī kvazi-ģeoīds, lai gan visiem savietotajiem punktiem ir normālie augstumi. Vienkāršāk ģeogrāfiski piesaistīto ģeoīda modeli saukt par GPS-ģeoīdu. Darba autors piedalījās darba grupās kopīgi ar Dānijas, Igaunijas un Lietuvas ģeodēzistiem, kurās tika izstrādāta turpmākā darbu gaita un ģeodēzisko tīklu attīstība nākotnē. Darbi, kas aizsākās Dānijas–Baltijas sektora programmas laikā, turpinās vēl arī šodien. Izvērtējot pēc speciālajiem punktiem mūsu GPS-ģeoīda modeļa **LV'98 precizitāti**, tā nav augstāka par **6-8 cm**. Citu rezultātu visas valsts teritorijai sasniegt pašlaik nav reāli, kamēr nav iegūts pietiekami drošs un pārbaudīts savietoto ģeodēzisko punktu tīkls, pabeigti gravimetriskie mērījumi. Teorētiski sasniedzamā GPS-ģeoīda modeļa precizitāte ir 1–2 cm robežās. Tas nodrošina lokālu augstuma tīklu, ģeodēzisko sistēmu savstarpēju integrāciju un sasaisti globālā mērogā.

- Atšķirīgu metožu ceļā iegūto ģeoīdu modeļu integrācija.

Darbā tiek lietotas divas neatkarīgas metodes ģeoīda virsmas noteikšanai. Viena metode ir balstīta uz gravimetriskiem mērījumiem, bet otra – pēc DGPS/DGNSS un nivelēšanas tīklu savietotajiem punktiem. Darba noslēguma posmā abi šie rezultāti tiek **apvienoti vienā GPS-ģeoīda modelī** ar nosacījumu, lai tas visprecīzāk atbilstu valstī lietotajai ģeodēziskajai atskaites sistēmai LKS-92. Iegūtajam modelim ir piešķirts nosaukums LV'98. Strādājot no bāzes staciju tīkla LatPOS gan reālā laikā uz lauka, gan vēlāk datu pēcapstrādē, tiek lietots šis normālā augstuma noteikšanas modelis. Tas ir iestrādāts lietošanai

pēc izvēles vairākos GPS/GNSS firmu ražotajos uztvērējos. Gan firmu *Trimble*, gan *Leica* uztvērēju ģeodēzisko aprēķinu programmatūrā jau ir ievietots šis GPS-ģeoīda modelis.

- Globālo kosmisko metožu izmantošana ģeoīda modelēšanā.

Nākotnē ģeoīda modeļa precizēšanai un tā vērtību daudzkārtējai kontrolei iespējams izmantot neatkarīgas fundamentālās ģeodēzijas metodes. Kopā ar Rīgas absolūto gravimetrisko punktu turpat darbojas ZMP lāzera lokācijas stacija (SLR), kas sniedz neatkarīgu ģeodēzisko modeļa novērtējumu. Jāizmanto arī Ventspils novadā Ances pagastā esošā Irbenes radioteleskopa tehniskās iespējas, veicot ļoti garas bāzes interferometrijas (VLBI) mērījumus un pielietojot iegūtos rezultātus ģeodēziskās atskaites sistēmas nostiprināšanā un zinātniski novatorisku globālu risinājumu radīšanā. Latvijai visās šajās fundamentālajās jomās Baltijas valstu vidū saglabājas lielākās attīstības iespējas.

- Visu pieejamo gravimetrisko datu izvērtēšana.

Plašāki mērījumi ir veikti Latvijā pirms Otrā pasaules kara zinātnieka Voldemāra Junga vadībā, kas bija arī vienīgie pieejamie gravimetriskie dati Ziemeļvalstīs līdz pat Latvijas neatkarības atgūšanai un datu bāzes informācijas papildināšanai 1994. gadā. Savukārt visu padomju laika periodu pēc Otrā pasaules kara līdz pat 1991. gadam šī informācija bija slepena kā stratēģiskas nozīmes informācija, kas nebija brīvi pieejama pat savas valsts pilsoņiem, nemaz nerunājot par ārzemniekiem, kaut vai tikai zinātniskiem mērķiem.

- Speciālistu trūkums un ārzemju kolēģu atbalsts.

Līdz ar to pēc valsts neatkarības atgūšanas šis slepenības aizplīvurotais temats bija īpaši zinātniski saistošs kā līdz šim neizsniedzams, bet tagad kļuvis pieejams. Neviena speciālista Latvijā nebija. Interesi par gravimetriju pastiprināja ārzemju kolēģu atbalsts, lai risinātu kopējus zinātniskus uzdevumus. Sadarbības ar Somijas Ģeodēzijas institūtu un vēlāk arī ar Dānijas ģeodēzistiem rezultātā tika sākti fundamentāli gravimetriskie darbi ar lielu paliekošu nozīmi.

- Teorētiskā sagatavošanās un gravimetrisko vietu izvēle.

Pēc teorētiskās sagatavošanās posma pabeigšanas darba autors sāka absolūto gravimetrisko vietu izvēli valsts teritorijā, apmeklējot daudzas Latvijas baznīcas gan Kurzemē, gan Latgalē ar mērķi ierīkot gravimetriskās bāzes vietu. Tas nepieciešams tamdēļ, lai ierīkotais gravimetriskais punkts saglabātos neskarts maksimāli ilgi vēl daudzām nākamām paaudzēm. Ilgstošam pielietojumam atbilstīgs punkts tika izveidots Popes baznīcā Ventspils rajonā. Kā īpaša vieta tika izvēlēts LU Astronomijas institūtam piederošais pulksteņa pagrabs Botāniskajā dārzā. Uz šiem trīs bāzes punktiem jeb nosacīti – trīs vaļiem – ir balstīts viss

Latvijas turpmākais gravimetriskais tīkls. Gan valsts gravimetriskās atbalsta sistēmas izveide, gan turpmākie mērījumi ir šī darba autora tiešs nopelns un ieguldījums.

- Jauna gravimetra iegāde un sabiezinošie tīkla mērījumi Baltijas valstīs.

Sabiezinošā tīkla mērījumi Latvijā aizsākās Dānijas–Baltijas ģeodēzijas sektora programmas izpildes laikā, kad 1998. gadā tika uzsākts veidot valsts gravimetrisko pamattīklu, saslēdzot saistītā ķēdē 9 Baltijas valstu gravimetriskos bāzes punktus. Pēc tam pašiem tika iegādāts relatīvais gravimetrs CG-3, pirmais modernākais gravimetrs Baltijas valstīs. Arī minētā pamattīkla izveide, sabiezinošie tīkla mērījumi un sākotnējais darbs ar jauno relatīvo gravimetru ir šī darba autora personīgais devums.

- Gravimetrisko datu ciparošana un sakārtošana vienā atskaites sistēmā.

Tā kā valsts teritorijas gravimetriskās uzmērīšanas darbs ir ļoti laikietilpīgs, par ko autors pārliecinājies personīgi, tad vienīgā un ātrākā iespēja iegūt precīzu ģeoīda modeli bija operatīvi izmantot jau uzmērītos un pieejamos ģeodēziskos datus. Visu nepieciešamo datu iegūšana, sakārtošana un apstrāde bija darba autora svarīgs uzdevums, lai varētu uzsākt ģeoīda modeļa aprēķinus. Gravimetriskie dati bija pieejami galvenokārt tikai papīra karšu lapu mērogā 1 : 200 000 formā, pie kam šie dati katrā lapā bija attēloti savā atskaites sistēmā. Visu karšu lapu nociparošanu veicu pats personīgi, tādējādi izvairoties no atšķirīgu izpildītāju radītajām sistemātiskajām kļūdām un līdz minimumam samazinot datu nehomogenitāti. Rezultātā tika iegūta gravimetriskā informācija par 12 000 punktiem. Lai šādu punktu apjomu samērītu ar gravimetru, tad vienam ģeodēzistam jāstrādā 20 gadus. Tas balstās uz pieņēmumu, ka vidēji sezonā ar vienu gravimetru viens cilvēks uzmēra 600 punktus. Pēc šo datu pārceļšanas no papīra formāta uz digitālo vēl bija jāveic to transformēšana uz vienotu atskaites sistēmu.

- Programmatūra GRAVSOFTE un programmēšanas veikšana.

Koordinātu pārrēķināšanu un citus standartizētus aprēķinus veicu, pielāgojot Latvijas situācijai atvērtā koda programmpaketes GRAVSOFTE sniegtos risinājumus. Programmas ir uzrakstītas programmēšanas valodā FORTRAN, kas ir darba autoram zināma programmēšanas valoda. Tādējādi varēju droši izpildīt nepieciešamos teorētiskos aprēķinus. Latvijas datu specifikas dēļ bija jāveic daudzi nestandarta pārrēķini, kad gravimetriskās vērtības iegūšanas formulas jāizveido un jāpārbauda pašam. Līdz ar to tādi speciāli risinājumi nebija pieejami GRAVSOFTE paketē. Tādos gadījumos veicu patstāvīgus programmēšanas darbus, paplašinot programmu paketes GRAVSOFTE aprēķinu iespējas un pielietojumu.

- Nociparoto karšu datu zinātniska un praktiska izvērtēšana.

Iegūtie vairāk nekā 12 000 punktu dati bija rūpīgi jāpārbauda. Detalizēti analizēju gravimetrisko punktu vērtības, tika izpildīts ievērojams salīdzināšanas darbs. Lai šos datus varētu izmantot ne tikai Latvijas, bet arī visu Ziemeļvalstu zinātnieki, tad tie ir ievadīti kopējā NKG datu bāzē un atrodas starptautiskā aprītē.

- Globālā vispasaules gravitācijas modeļa un digitālā augstuma modeļa pielietošana Latvijas teritorijā.

Tālākajā darba gaitā iegūtie lokālie gravimetriskie dati lietoti GRAVSOFIT programmās ģeoīda virsmas modelēšanai. Obligāti jālieto globālie Zemes gravitācijas lauka modeļi, kas noteikti kosmisko pavadoņu lidojumu laikā, pielietojot summētās vidējās gravimetriskās vērtības uz zemes. Darbā kā atskaites globālais gravitācijas lauks tiek izmantots **vispasaules gravitācijas modelis EGM96**. Modelēšanas aprēķinos tiek izmantota šī globālā lauka vērtību un lokālā gravimetriskā lauka vērtību starpība, jo šīs starpības vidējā vērtība ir tuva nullei un līdz ar to virsmas integrāļa aprēķinos iegūstam ātrāku matemātisko atrisinājumu. Ģeoīda aprēķināšanas gaitā vēl nepieciešams digitālais augstuma modelis. To patstāvīgi ieguvu no interneta tīmekļa un izmantoju savā darbā. Augstuma modeļa saīsinātais starptautiskais nosaukums ir GLOBE.

- Gravimetriskās sistēmas starptautiskā uzturēšana.

Lai nodrošinātu precīzus gravimetriskos un telpiskos datus jebkurā atskaites momentā, tiek veikti regulāri atkārtotie gravimetriskie mērījumi sistēmas bāzes punktos. Jaunākie atkārtotie absolūtie gravimetriskie mērījumi ir izpildīti Rīgā, 2007. gada decembrī. Kā specifisks elements gravimetrisko datu kontrolē un sasaistē ir 1999. gadā notikušie aerogravimetriskie mērījumi Baltijas jūrā. To laikā tika veikta speciāli aprīkotās lidmašīnas nosēšanās Liepājas lidostā, un darba autors izpildīja lidmašīnas gravimetra kalibrēšanu Latvijas gravimetriskajā tīklā.

- Turpmākie darbi jauna precizitātes līmeņa ģeoīda modeļa iegūšanai.

Viena centimetra ģeoīda precizitātes sasniegšanai tiek veikta **plānveidīga valsts pirmās klases nivelēšanas tīkla atjaunošana 3000 km** kopgarumā. Darbu pabeigšana tiek plānota 2010. gadā. Izpildes gaitā **darbi tiek starptautiski koordinēti** ar Lietuvas un Igaunijas speciālistiem, kā arī regulāri analizēti Ziemeļvalstu ģeodēziskās komisijas darba grupās. Uzdevumu izpildi sekmē globālā zemes gravitācijas lauka modeļa attīstība, kur principiāli jaunas kvalitātes rezultāti ir sagaidāmi **pēc GOCE misijas** noslēguma. Var apgalvot, ka šie jaunās kosmiskās misijas rezultāti netiešā veidā uzlabos mūsu valsts

ģeodēzisko pamattīklu un ģeoīda modeļa precizitāti. Ģeodēzistu ilggadējais darbs kalpo arī jaunāko kosmisko misiju rezultātu izvērtēšanai. Tādējādi no darbā aprakstītā tehnoloģiskā procesa ieguvēji ir visi tajā iesaistītie ģeodēzijas nozares speciālisti un aprēķinātā GPS-ģeoīda lietotāji.

PUBLIKĀCIJAS

1. Kaminskis, J. Latvijas ģeoīda modelēšanas apgabali un rezultāti. RTU zinātniskie raksti „Ģeomātika”, 11. sērija, 6. sējums, 2009, 8. – 17. lpp.
2. Kaminskis, J. Apvienotais Latvijas gravimetriskais ģeoīds. RTU zinātniskie raksti „Ģeomātika”, 11. sērija, 5. sējums, 2009, 13. – 20. lpp.
3. Vallis, A., Kaminskis, J. Latvijas Republikas pirmās klases ģeodēziskā tīkla mērījumu analīze. RTU zinātniskie raksti „Ģeomātika”, 11. sērija, 4. sējums, 2008, 13. – 19. lpp.
4. Kaminskis, J., Helfriča, B. Vietējo ģeodēzisko tīklu stāvoklis un attīstība Latvijā. RTU zinātniskie raksti „Ģeomātika”, 11. sērija, 3. sējums, 2008, 22. – 28. lpp.
5. Kaminskis, J. Ģeoīds kā GPS būtiska sastāvdaļa praktiskajā darbā. 1. Baltijas simpozījs „GPS pielietošana un bāzes staciju tīkla izveidošana”, VZD, Rīga, 2001, 53. lpp.
6. Kaminskis, J., Forsberg, R. A New Detailed Geoid for Latvia; Paper for International Symposium on Gravity, Geoid, and Marine Geodesy 1996. 30 Sept. – 5 Oct., 1996. The University of Tokyo, Tokyo, IAG Symp. Series, 117, p. 621-628, Springer, Berlin Heidelberg, 1997, ISBN 3-540-63352-9.
7. Kaminskis, J., Forsberg, R. The geoid determination in Latvia from gravity and satellite altimetry. In: Reports of FGI, No. 96:2. Helsinki, 1996, p. 149-155.
8. Ellmann, A., Kaminskis, J., Parseliunas, E., Jürgenson, H., Oja, T. Evaluation results of the Earth Gravitational Model EGM08 over the Baltic countries. Newton's Bulletin, 4, 2009, p. 110-121. (special issue of the International Geoid Service and the Bureau Gravimétrique International).
9. Forsberg, R., Kaminskis, J., and Solheim, D. Geoid of the Nordic and Baltic Region from Gravimetry and Satellite Altimetry. In: Gravity, Geoid and Marine geodesy. (Segawa, J., Fujimoto, H. and Okubo, S., eds.), IAG Symp. Series, 117, p. 540-547, Springer, Berlin Heidelberg, 1997, ISBN 3-540-63352-9.
10. Forsberg, R., Kaminskis, J., Solheim, D. The NKG-96 Geoid. Reports in Geodesy and Geographical Information systems, 13th General meeting of the NKG, 1999, p. 255 - 262, printed in 2001 Gavle, Sweden, ISSN 0280-5731.
11. Celms, A., Kaminskis, J. Levelling results of first order line Kolka – Rucava. Baltic Surveying '05, Latvia University of Agriculture. Jelgava, 2005, p. 165 – 170.

12. Jivall, L., Kaminskis, J., Parseliunas, E. Improvement and extension of ETRS 89 in Latvia and Lithuania based on the NKG 2003 GPS campaign. EUREF Publication No.16 (Band 40), Frankfurt am Main 2008, p. 156-162, ISBN 3-89888-845-2.
13. Kaminskis, J. Latvia National Report about Geodetic Activities. EUREF Publication No.16 (Band 40), Frankfurt am Main, 2008, p. 246-248, ISBN 3-89888-845-2.
14. Zvirgzds, J., Kaminskis, J., Lieksne, L. GPS Reference Station Network of Latvia LATPOS. EUREF Publication No.16 (Band 40), Frankfurt am Main, 2008, p. 375 - 376, ISBN 3-89888-845-2.
15. Kaminskis, J. National Report of Latvia. EUREF Publication No.15 (Band 38), Frankfurt am Main, 2006, p. 253 - 254, ISBN 3-89888-799-5.

PIEDALĪŠANĀS KONFERENCĒS

1. Piedalīšanās ar ziņojumu „Latvijas ģeodēzisko atbalsta tīklu attīstība pēdējos 10 gados” LU 68. konferencē Astronomijas un ģeodēzijas sekcijā Raiņa bulv. 19, 2010. gada 19. februārī.
2. Piedalīšanās ar ziņojumu „Ģeoīda modeļa attīstība ģeodēzijas darbos” LU 68. konferencē Ģeomātikas (ĢIS un tālizpēte) sekcijā Alberta ielā 10, 2010. gada 2. februārī.
3. Piedalīšanās ar ziņojumu „Relatīvie gravimetriskie pētījumi Pērnavas poligonā” LU 67. konferencē Ģeomātikas (ĢIS un tālizpēte) sekcijā Alberta ielā 10, 2009. gada 3. februārī.
4. Piedalīšanās ar ziņojumu „Relatīvie gravimetriskie mērījumi ar CG-5” LU 67. konferencē Astronomijas un ģeodēzijas sekcijā Raiņa bulv. 19, 2009. gada 12. februārī.
5. Piedalīšanās ar ziņojumu „Latvijas absolūtā un relatīvā gravimetrisko tīklu attīstība” RTU 48. starptautiskajā zinātniskajā konferencē Ģeomātikas apakšsekcijā Āzenes ielā 16, 2007. gada 12. oktobrī.
6. Piedalīšanās ar ziņojumu „2006. gada Starptautiskais EUREF simpozījs Rīgā” LU 64. konferencē Astronomijas un ģeodēzijas sekcijā Raiņa bulv. 19, 2006. gada 10. februārī.
7. Piedalīšanās ar ziņojumu „Nivelējumu paaugstinājumu izmaiņu analīze līnijās Demene-Jēkabpils un Ainaži-Rīga” LU 63. konferencē Ģeogrāfijas sekcijā (Ģeomātika) Alberta ielā 10, 2005. gada 28. janvārī.
8. Piedalīšanās ar ziņojumu 2010. gada 12. aprīlī „Geoid model for surveying in Latvia” Starptautiskās mērnieku federācijas (FIG) 24. kongresā Sidnejā, Austrālijā no 2010. gada 10. aprīļa līdz 16. aprīlim.
9. Piedalīšanās ar ziņojumu (10. septembrī) 3. Baltijas-Šveices ģeodēzijas zinātniskajā nedēļā no 2008. gada 10. septembra līdz 12. septembrim Tallinā. Programma atrodama internetā, sk.: <http://www.gece.ttu.ee/~artu/SWISS/>

10. Piedalīšanās ar ziņojumu (20. jūnijā) Eiropas ģeodēzijas simpozijā EUREF 2008 no 2008. gada 17. jūnija līdz 21. jūnijam Briselē. sk.:
<http://www.epncb.oma.be/EUREF2008/program.php>
11. Piedalīšanās ar ziņojumu 7. Starptautiskajā konferencē Vides inženierzinātnēs no 2008. gada 22. maija līdz 23. maijam Viļņā (VGTU) 5. sekcijā – Ģeodēzijas un kadastra tehnoloģijas.
12. Piedalīšanās ar ziņojumu LLU organizētajā konferencē Jelgavā Baltic Survey 2008' no 2008. gada 8. maija līdz 9. maijam. Piedalās visas 3 Baltijas valstis un Baltkrievijas kolēģi.
13. Piedalīšanās ar ziņojumu Ziemeļvalstu ģeodēziskās komisijas (NKG) Darba grupas sanāksmē par Ģeodēziskām atskaites sistēmām un pozicionēšanu Kopenhāgenā no 2008. gada 15. janvāra līdz 16. janvārim.
14. Piedalīšanās ar ziņojumu 12. Baltijas militārajā ģeotelpiskās informācijas konferencē Rīgā viesnīcā *Reval Hotel* Latvija 2007. gada 31. oktobrī. Piedalās visas 3 Baltijas valstis un dalībnieki no NATO valstīm.
15. Piedalīšanās ar ziņojumu 8. jūnijā 7. sesijā Eiropas ģeodēzijas simpozijā EUREF 2007 no 2007. gada 6. jūnija līdz 9. jūnijam Londonā.
16. Piedalīšanās ar ziņojumu Ziemeļvalstu ģeodēziskās komisijas (NKG) Darba grupas sanāksmē par Ģeodēziskām atskaites sistēmām un ģeodinamiku Tallinā no 2007. gada 27. marta līdz 29. martam.

PROMOCIJAS DARBS

IZVIRZĪTS RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2010. gada 22.oktobrī plkst.14:15 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības fakultātē, Āzenes ielā 16, sēžu zālē.

OFICIĀLIE RECENZENTI

- 1) Dr.sc.ing. Andres Rūdja, chief engineer PLANSERK AS (Igaunija),
- 2) Dr.sc.ing. Romuald Obuchovski, Department of Geodesy and Cadastre, Vilnius Gediminas Technical University (Lietuva),
- 3) Dr.sc.ing. prof. Modris Dobelis RTU P-06 padomes loceklis, zinātņu nozares Būvzinātne, apakšnozares Ģeodēzija eksperts.

APSTIPRINĀJUMS

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

Jānis Kaminskis(Paraksts)

Datums:

Kaminskis, J. Latvijas ģeoīda modelis un tā
attīstība. Promocijas darba kopsavilkums.
R.: RTU, 2010. 32 lpp.

Iespiests saskaņā ar Rīgas Tehniskās universitātes
Būvniecības fakultātes Ģeomātikas katedras
2010.gada 31.marta lēmumu, protokols Nr. 184/4