

COMBINED LATVIAN GRAVIMETRIC GEOID**APVIENOTAIS LATVIJAS GRAVIMETRISKAIS ĢEOĪDS**

Jānis Kaminskis, M Sc., Director of Geodesy department, Latvian Geospatial Information Agency, O.Vaciesa iela 43, Riga LV-1004, janis.kaminskis@lgia.gov.lv

Atslēgas vārdi: ģeoīds, gravimetrija, gravimetriskie mērījumi, altimetrija, vielas blīvums

Ievads

Aprakstot Latvijas gravimetrisko ģeoīdu LV'98, jau sākumā jāatzīmē, ka tas ir brīvi pieejams digitālā veidā balstoties tieši uz aprēķinos lietotajiem ciparotajiem gravimetrijas datiem, kā arī pateicoties gravimetrijas datiem Baltijas jūrā, kas iegūti no zemes mākslīgā pavadoņa (ZMP) ERS-1 ģeodēziskās misijas altimetrijas uzmērījumiem. Tālākie matemātiskie aprēķini ir veikti pēc speciālas Furjē transformācijas (FFT) paņēmiena, kurā visi aprēķini notiek uz sfēras 1,5' x 3,0' (minūšu) grādu režģī. Latvijas ģeoīda gadījumā aprēķinu rezultāti uzrāda būtiskus iegūtās informācijas uzlabojumus gadījumam, kad tiek izmantoti ZMP ERS-1 dati. Kopējā Latvijas ģeoīda precizitāte, pārbaudot to pēc atlasītiem 32 Latvijā savietotajiem GPS/nivelēšanas punktiem, ir ne sliktāka kā 8 cm.

Lietotie gravimetriskie dati

Iepriekšējā Latvijas ģeoīda modeļa noteikšanai netika izmantoti sauszemes gravimetrijas dati ar augstu punktu blīvumu, t.i. 16 punkti uz 10 kvadrātkilometriem. Šādi blīvi ciparotie gravimetriskie dati ir pieejami, kā arī dati no ERS-1. Agrākos periodos Baltijas reģionam veidotie ģeoīdi ir neprecīzāki datu iztrūkuma dēļ. Iepriekšējais Latvijas ģeoīda modelis bija aprēķināts lietojot minimālu datu apjomu, kuru sagatavošanu un aprēķinus izpildīja K.Kūkums 1993.gadā Somija Ģeodēzijas Institutā (FGI), [1]. No speciālajām gravimetrijas kartēm mērogā 1:200 000 tika nolasīti vairāk kā 12200 punktu. Vairumā gadījumu oriģinālie gravimetriskie mērījumi tika veikti 20 gadsimta 50-tajos un 70-tajos gados. Tos izpildīja uzņēmums „Specgeofizika” no Maskavas. Bet pašreiz valsts gravimetrijas atskaites vērtību līmenis ir fiksēts trīs absolūtās stacijās Popē, Ventspils rajonā, Rīgā, Botāniskajā dārzā un Višķos, Daugavpils rajonā, kuras 1995.gada oktobrī un novembrī ir saistītas vienotā tīklā, izpildot gravimetriskos novērojumus. Šajos darbos tika izmantots Somijas ģeodēzijas institūta aprīkojums, prof. J.Makinena vadībā. 1996.gadā Latvijas galvenajā absolūtās gravimetrijas nulles līmeņa stacijā Botāniskajā dārzā tika veikti atkārtoti absolūtās gravimetrijas mērījumi. Tos veica pārstāvji no Praktiskās ģeodēzijas institūta (IfAG) no Vācijas (R.Falk) un pārstāvji no Aizsardzības kartēšanas aģentūras (DMA) (D.J.Stizza un W.Wangler) no ASV. Atšķirības starp visiem novērojumiem Starptautiskā Gravimetriskā Standarta tīkla 1971 (IGSN71) ietvaros bija mazākas par 30 μGal. Gravimetriskajām kartēm bija pieejams tikai atšķirīgas datu pārklājuma kopas. Karšu ciparošanai tika izmantoti Dānijas Nacionālā mērniecības un kadastra centra (KMS) tehniskie resursi un datortehnika.

Gravimetriskās kartes pēc satura var iedalīt trijās apakškopās:

- 1) Punkti ar brīva-gaisa anomālijām un normāliem augstumiem,
- 2) Punkti ar brīva-gaisa un Bugē anomālijām,
- 3) Punkti tikai ar Bugē divu veidu anomālijām, atkarībā no virskārtas iežu blīvuma.

Ir būtiski ievērtēt atšķirības starp vēsturisko Potsdamas atskaites sistēmu un šodienas IGSN71 sistēmu datu aprēķinu procesā.

Visu triju datu apakškopām tika lietotas sekojošas normālā gravimetrijas lauka uz elipsoīda aprēķinu formulas:

$$\gamma_{\text{HELMERT}} = 978030 (1 + 0.005302 \sin^2 \varphi - 0.000007 \sin^2 2\varphi) \text{ mGal};$$

$$\gamma_{\text{GRS80}} = 978032.7 (1 + 0.0053024 \sin^2 \varphi - 0.0000058 \sin^2 2\varphi) \text{ mGal}.$$

Pirmajā gadījumā, kad bija normāli augstumi H un virszemes anomālijas no 3710 karšu punktiem, mēs tiešā veidā konvertējām anomālijas atpakaļ gravimetrijas vērtībām katrā punktā IGSN71 sistēmā, un atvasinājām jaunās gravimetrijas anomālijas, lietojot ģeodēzijā rekomendēto sistēmu 1980 (GRS80) normālā gravimetrijas formulā sekojošā veidā:

$$g_{\text{IGSN71}} = \gamma_{\text{HELMERT}} + \Delta g_{\text{FA}} - 14.0 - 0.3086 H;$$

$$\Delta g_{\text{FA_GRS80}} = g_{\text{IGSN71}} - \gamma_{\text{GRS80}} + 0.3086 H.$$

Izejot no trīs absolūtajiem gravimetrijas novērojumiem konstatējām zināmo atšķirību 14.0 mGal, salīdzinot ar veco Potsdamas gravimetrijas atskaites sistēmu.

Otrajā gadījumā, sauszemes datu apakškopai 775 punktiem tika piemērota sekojoša formula:

$$H = \Delta g_{\text{FA}} - \Delta g_{\text{Bugē}} / 0.0964$$

Ja blīvums ir = 2.3g/cm³ vai

$$H = \Delta g_{\text{FA}} - \Delta g_{\text{Bugē}} / 0.1119$$

Ja blīvums ir = 2.67g/cm³ tika izmantots Bugē anomāliju kalkulācijās.

Trešajā gadījumā, kad 7003 punktos kartēs bija dotas tikai Bugē anomālijas, tad lietoja globālo sauszemes viena kilometra (GLOBE) digitālo augstuma modeli (DTM) ar 0.5' x 0.5' grādu skalu (no Nacionālā ģeofizikālā datu centra, Boulder), lai interpolētu augstumus un pēc tam iegūtu gravimetrijas vērtības vecajos novērojumu punktos.

Dziļuma noteikšanai Rīgas jūras līcī, kad bija pieejamas virszemes un Bugē anomālijas, tika lietota sekojoša formula:

$$D = \Delta g_{\text{FA}} - \Delta g_{\text{Bugē}} / 0.05324$$

Dziļuma noteikšanai gravimetrijas mērījumu vietās (pie raksturīgā blīvuma 2.3g/cm³). Gadījumā, kad jūrā mūsu rīcībā bija tikai Bugē anomālijas, dziļums tika ņemts no batimetriskās kartes mērogā 1:200 000.

Pēc tam datu transformācijai sistēmā GRS80 pielietojā sekojošu formulu:

$$g_{\text{IGSN71}} = \gamma_{\text{HELMERT}} + \Delta g_{\text{Bugē}} - 14.0 + 0.05324 D;$$

$$\Delta g_{\text{FA_GRS80}} = g_{\text{IGSN71}} - \gamma_{\text{GRS80}},$$

kur D ir dziļumi (negatīvas vērtības).

Visas augstāk minētās formulas ir balstītas uz Bugē anomāliju aprēķināšanas tuvinātajām vērtībām, kas seko no dažādaī videi raksturīgā vielas blīvuma vērtības pielietošanas.

Altimetrisko mērījumu gravimetriskie dati

Pēc sauszemes datu sagatavošanas, nākamais būtiskais solis bija aizpildīt baltos plankumus Baltijas jūrā, kuros nebija gravimetrijas datu. Tas radīja nepieciešamību izmantot ar satelīta palīdzību iegūtos augstuma mērīšanas datus ERS-1 ģeodēziskās misijas laikā, [2]. Pievienojām no satelīta augstuma mērījumiem atvasinātu virszemes anomāliju vērtības ģeoida kalkulācijās, [3]. Dati, kas iegūti no satelīta, tika pārklāti uz eksistējošiem gravimetrijas datiem gar Baltijas jūras piekrasti, tādējādi samazinot ūdens virsmas topogrāfiskās (SST) kļūdas un piekrastes efektus (nepilnīgs augstuma

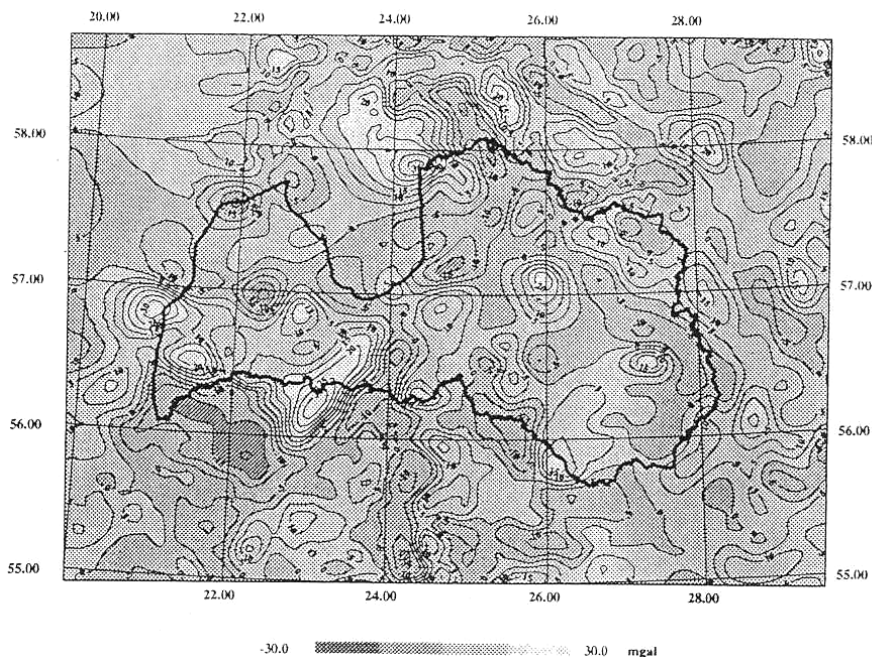
virsmas pārklājums). Pirmkārt, veicu korekcijas iedomātā jūras līmeņa topogrāfijas (MSST) augstuma mērījumos, kā to pamatojuši M.Ekmans un J.Makinens savā publikācijā, [4].

Satelīta noteiktie augstuma dati tika apstrādāti sekojošos soļos:

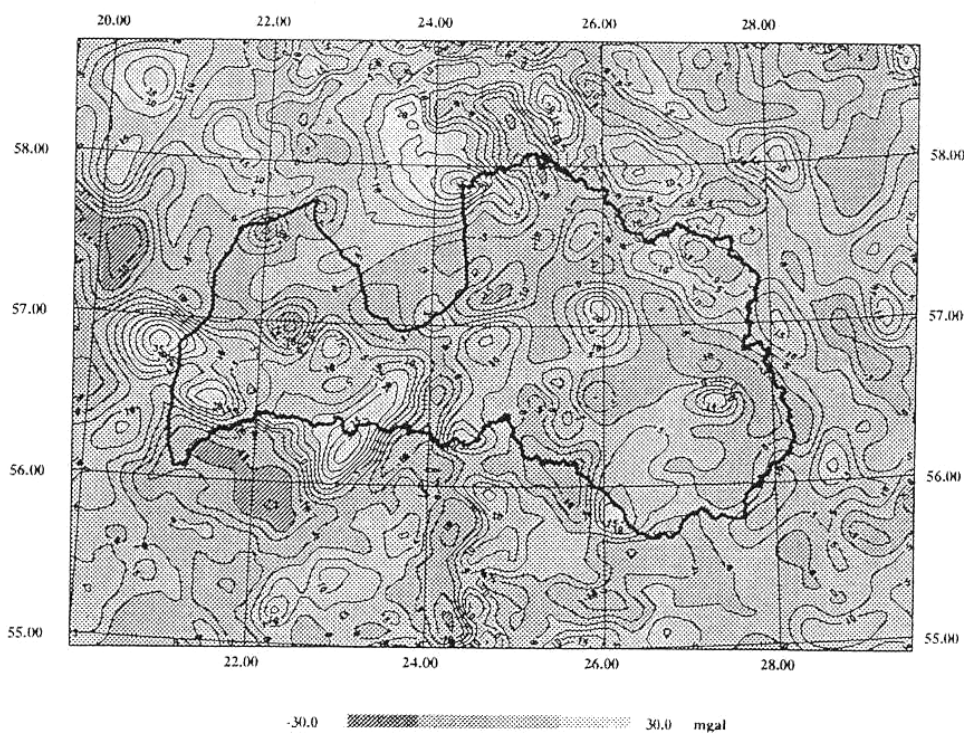
- ✓ Augstuma mērījumu datu pielāgošana (lai tie derētu pēc vertikāļu un horizontāļu samazināšanas uz 12.7cm), [5];
- ✓ Datu kartēšana un datu filtrēšana ar Stoksa FFT Wiener filtru, lai pārvērstu augstuma datus gravimetrijas datus;
- ✓ Atvasināto gravimetrijas datu tīkla "pārklāšana" pār zināmām gravimetrijas vērtībām izmantojot gludu interpolācijas funkciju;
- ✓ Augstuma mērījumu datu izvēle vietās, kur 7 km attālumā nav pieejami citi sauszemes gravimetriskie dati.

Aktuālās virszemes anomāliju vērtības, kas tika saņemtas no ERS-1 bija kā atslēga, lai varētu pilnvērtīgi apstrādāt retos gravimetrijas datus uz jūras. Šī procedūra sniedza mums kopu ar reducētajām virszemes anomālijām ar labu Latvijas un tai pieguļošās teritorijas pārklājumu, kā tas nepieciešams ģeoīda izskaitļošanai.

Aprēķiniem lietoto brīva-gaisa anomālijas



1.att. EGM96 reducētās Latvijas virszemes anomālijas, kas iegūtas no sauszemes gravimetrijas datiem, k.i.: 5 mGal.



2.att. EGM96 reducētās Latvijas virszemes anomālijas, kas iegūtas no sauszemes gravimetrijas un ERS-1 datiem, k.i.: 5 mGal.

Salīdzinot abus attēlus varam redzēt kādu ietekmi ir atstājuši altimetriskie mērījumi no satelīta Baltijas jūrā, kas īpaši labi izteikts attēla ziemeļrietumu stūrī. 2. attēlā pēc ERS-1 datu pievienošanas ir iespējams saskatīt daudz sīkākas gravimetriskā lauka detaļas kā pirms tam, [6].

Par reducētajām virszemes anomālijām uzskatām:

$$\Delta g_{FA_red} = \Delta g_{FA} - \Delta g_{ref} - \Delta g_{RTM}$$

Kur „ref” sfērisko harmoniku efekts no globālā EGM96 gravimetrijas modeļa līdz 360 grādiem un kārtas, [7] un „RTM” apvidus lokālais reljefa efekts.

Ģeoīda modeļa aprēķināšana

Lai noteiktu galējo Latvijas ģeoīdu, pielieto pa vairākiem meridiāniem vērsto sfērisko Stoksa FFT, lai iegūtu interesējošos ģeoīda augstumus un tad tos atkal summētu, [8]. Šo aprēķinu pamat formula ir:

$$\zeta_{red} = F^{-1} (F (S(\Psi)) F(\Delta g)),$$

kur F ir divu dimensiju Furjē transformācija uz sfēras un S ir Stoksa funkcija. Aprēķināšana tika veikta 1.5' x 3.0' koordinātu tīklā uz sfēras. Virszemes anomāliju statistiskais raksturojums, kuras tika izmantotas ģeoīda noteikšanai ir apkopotas pirmajā tabulā.

Virszemes gravimetrijas anomāliju statistiskais raksturojums. (vienības mGal)

Statistika	vidējais	Min	max	Standart novirze
Pa visu Latviju ⁽¹⁾	-6.16	-65.20	44.01	14.43
ERS-1 ⁽²⁾	-2.39	-51.26	34.38	8.94
ERS-1 ⁽³⁾	1.71	-29.00	38.41	9.22
Visi dati ⁽⁴⁾	0.80	-52.33	76.96	9.07

⁽¹⁾ Nereducētās sauszemes gravimetriskās anomālijas apvidū no 55.0 līdz 58.5 grādiem platumā un no 20.0 līdz 29.0 grādiem garumā.

⁽²⁾ Sauszemes gravimetriskās anomālijas Baltijas reģionā (reducētas par globālo gravimetrisko lauku) pēc ERS-1 rezultātiem.

⁽³⁾ Izvēlētās un piesaistītās gravimetriskās anomālijas pēc ERS-1 (3340 punkti) Baltijas reģionā.

⁽⁴⁾ Ieskaitot visus gravimetrisko punktus no Ziemeļvalstu (NKG) datu bāzes un ERS-1 novērojumiem.

Lai izveidotu Latvijas ģeoīda galējo versiju un to pārbaudītu, tika izmantoti vairāki resursi no GRAVSOFTE programmas paketes ģeodēzisko gravimetrijas lauka modelēšanai, [9].

Ņemot vērā atšķirīgos augstuma atskaites nulles līmeņa punktus starp Baltijas un Skandināvijas valstīm, tika piemērota 15 cm normālā augstuma korekcija, [10], kur:

$$H_{\text{Amsterdamas}} - H_{\text{Kronšates}} = 15 \text{ cm}$$

Pēc minētās normālā augstuma korekcijas, kas izmaina GPS nivelēšanas ceļā iegūtos ģeoīda augstumus par 15 cm, salīdzinām šīs vērtības ar gravimetriski aprēķinātiem ģeoīda datiem. Pieņemam, ka Latvijā, kur vidējais augstums ir ap 80 metriem un lielākais kalns ir 311.5 metri virs jūras līmeņa, tad tipiskā atšķirība starp normālajiem un ortometriskajiem augstumiem ir mazāka par 1 cm. Tātad šeit nebūs novērojama lielāka atšķirība starp ģeoīdu un kvazi-ģeoīdu, kas pamatota aprēķinātā ģeoīda modeļa precizitāti.

Latvijas gravimetriskais ģeoīds ar koordinātu režģi 1.5' x 3.0' iekļaujas GPS nivelēšanas testa punktos ar sekojošu precizitāti:

- ✓ 8 cm - kad tiek lietoti 32 GPS nivelēšanas punkti (min. un maks. atšķirība ir -31 cm un +18 cm),
- ✓ 5 cm - kad tiek lietoti 30 GPS nivelēšanas punkti, (min. un maks. atšķirība ir -14 cm un +15 cm).

Latvijas ģeoīdu aprēķina divas reizes, t.i. ar un bez gravimetriskajiem datiem, kas atvasināti no satelīta augstuma mērījumiem. Nav nekādas nepieciešamības attēlot grafiski abus ģeoīdus, jo tie vizuāli izskatās pilnīgi vienādi. Tomēr izskaitļoto ģeoīdu statistiskie dati ir atšķirīgi un ir novērojami uzlabojumi līdz ar jaunu datu iekļaušanu aprēķinos.

Atšķirības GPS nivelēšanas atvasinātā un izskaitļotā ģeoīdu augstumos 32 stacijās (vienība: cm)

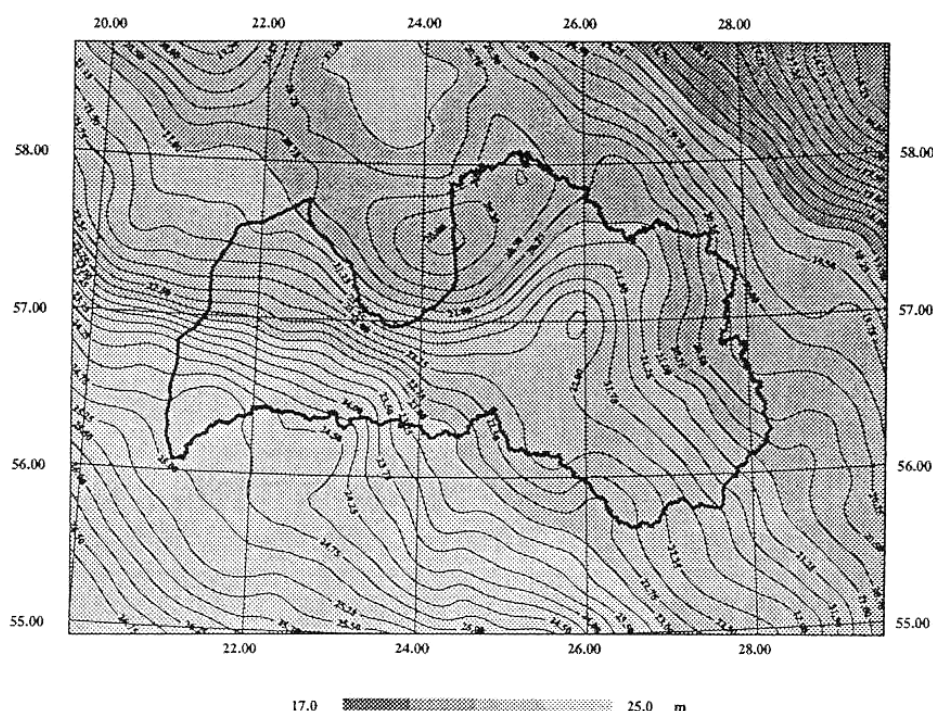
Statistika	vidējais	min	Max	Standart novirze	Standart novirze pēc piesaistes
Spherical FFT ⁽¹⁾	-83.4	-130.7	-23.9	26.4	13.7
Spherical FFT ⁽²⁾	-63.4	-89.6	-18.9	17.7	9.3
Spherical FFT ⁽³⁾	-67.7	-91.2	-36.1	15.0	8.0

- (1) Bez ciparotajiem Latvijas gravimetriskajiem punktiem.
- (2) Pēc normālo augstumu 15 cm korekcijas un ar aprēķinos iekļautajiem 12 239 ciparotajiem punktiem
- (3) Visa Ziemeļvalstu (NKG) datu bāzes informācija, ieskaitot ERS-1 novērojumus.

Ņemot vērā to, ka ģeoīda modeļa praktiskais pielietojums ir saistīts ar katru konkrētā uzdevuma specifiku, galvenokārt interesē standarta novirzes vērtības pēc ģeoīda savietošanas ar GPS nivelēšanas etalona punktiem.

Ar savietošanu tiek domāta ģeoīda transformācija pēc GPS nivelēšanas stacijām, lietojot 4-parametru Helmerta transformāciju. Ar šo darbību samazina globālās garo viļņu kļūdas un tiek absorbētas ģeodēzisko atskaišu sistēmu starpības. Ja pirms savietošanas nobīde starp GPS nivelētajiem un gravimetriski atvasinātajiem ģeoīda modeļiem 32 stacijās bija -67.7 cm tad pēc 4-parametru transformācijas nobīde starp šiem diviem risinājumiem ir nulle. No tā seko, ka Latvijas gravimetriskā ģeoīda modeļa absolūtais augstums ir par 67.7 cm zemāks nekā Skandināvijas ģeoīda modeļa līmenis.

Otrajā tabulā var novērot, ka augstuma mērījumi no satelīta sniedz pamanāmus uzlabojumus Latvijas ģeoīda modelim, t.i. par 1.3 cm. Tas ļauj izdarīt secinājumus par ZMP augstuma mērījumu ietekmi uz ģeoīdu un to lomu ģeoīda noteikšanai, jo īpaši piejūras rajonos.



3.att. Latvijas gravimetriskais ģeoīds, k.i.: 0.25 m

Secinājumi

Gadījumos, kad nav pieejami tiešie gravimetriskie novērojumi jūrā vai uz ūdens, tad lietderīgi izmantot ZMP altimetriskos mērījumus, kurus ir iespējams konvertēt kā gravimetriskās anomālijas, kas turpmākajā procesā tiek izmantotas ģeoīda modeļa aprēķināšanā. Apskatītajā gadījumā Latvijas gravimetriskajā ģeoīda modelī LV'98 tika lietoti ZMP ERS-1 mērījumu rezultāti, kas sniedza ģeoīda modeļa precizitātes uzlabojumu par 1.3 cm, lietojot kā pārbaudes etalona punktus 32 ģeodēziskos GPS/nivelēšanas tīkla punktus.

Lai paaugstinātu minētā ģeoīda modeļa precizitāti, tad nepieciešams aprēķinos lietot pilnīgākus tieši novērotos gravimetriskos datus gan Latvijas teritorijā, gan uz jūras un aiz sauszemes valsts robežas. Kā arī jāatlasa un jāiegūst daudz blīvāks ģeodēzisko GPS/nivelēšanas tīkla punktu daudzums, kas tiek izmantoti ģeoīda modeļa novērtējumam un piesaistei lokālai koordinātu un augstuma sistēmai.

Literatūra

1. Kūkums K. Latvian geoid determination with mass point frequency domain inversion. Reports of Finnish Geodetic institute, 1993, 16 pp.
2. Andersen O.B., Knudsen P. Global gravity field from the ERS geodetic mission. Earth observation Quarterly, 47, ESRIN, pp. 1-5.
3. 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, Springer, Berlin Heidelberg, 1997, pp. 540-547.
4. Ekman M., Mäkinen J., Mean sea surface topography in a unified height system for the Baltic Sea area. Proceedings of the 12th General meeting of the NKG Ullensvang, Norway, 1994, pp. 244-258.
5. Knudsen P., Brovelli M., Collinear and cross-over adjustment of Geosat ERM and Seasat altimeter data in the Mediterranean Sea. Suveys in Geophysics, Vol. 14, N.4-5, 1993, pp.449-459.
6. Global Gravity Field Model, Global Mean Sea Surface,
http://www.space.dtu.dk/English/Research/Scientific_data_and_models.aspx
7. Pavlis N.K., Rapp R.H., Lemoine F.G., Kenyon S.C., High-resolution global geopotential models for the joint GSFC/DMA project. Presented at the International Symposium on Gravity, Geoid and Marine Geodesy 1996, Tokyo, Sept.30 – Oct.4.
8. Forsberg R., Sideris M.G., Geoid computations by the multi-band spherical FFT approach. Manuscripta Geodaetica, 18, 1993, pp. 82-90.
9. Tscherning C.C., Forsberg R., Knudsen P., Description of the GRAVSOFIT package for geoid determination. Proceedings of 1st Continental Workshop on the Geoid in Europe, Prague, 1992, pp.327-334.
10. Ihde J., Some remarks on geodetic reference systems in Eastern Europe in preparation of a uniform European geoid. Bulletin Geodesique, Vol.67, 1993, pp.81-85.

Kaminskis J. Apvienotais Latvijas gravimetriskais ģeoīds

Darbā ir aprakstīts gravimetrisko datu ciparošanas process, kura laikā bija jāsakaras ar atšķirīgu un neviendabīgu vēsturisko datu noklājumu. Rezultātā iegūtie izejas dati bija nepilnīgi, jo īpaši uz Baltijas jūras. Tamdēļ situācijai uzlabošanai bija nepieciešams izmantot ZMP ERS-1 altimetriskos mērījumus, kurus pārveidoja par gravimetrijas datiem. Pēc minēto izejas datu iegūšanas un analīzes nākošajā darba posmā ar speciālo programmu GRAVSOFIT tika aprēķināts valsts gravimetriskais ģeoīds vairākās kombinācijās. Salīdzinot dažādus ģeoīda modeļa risinājumus, kuros lietots atšķirīgs gravimetrisko datu apjoms, secinām ka altimetrisko datu iekļaušana ģeoīda modelēšanā mums sniedz precizitātes uzlabojumu par 1.3 cm.

Kaminskis J. Combined Latvian Gravimetric Geoid

In article, digitization process of gravimetric data is described. During the process different and uneven coverage of historical data was faced. Consequently, input data obtained were uncomplete, in particular, in the Baltic Sea. Therefore it was necessary to apply altimetric measurements by satellite ERS-1, which were converted into gravimetric data. After the obtaining and analysis of before-mentioned input data in the next stage of work, national gravimetric geoid in several combinations was calculated by use of special software GRAVSOFIT. Comparison of several solutions for the geoid model, for which different amount of gravimetric data was applied, allows to come to conclusion that inclusion of altimetric data into modelling of geoid gives improvement of accuracy for 1.3 cm to us.

Каминский Я. Объединенный Латвийский Гравиметрический геоид

В работе описан процесс цифрования гравиметрических данных, в процессе которого пришлось сопоставить с различным и неоднородным наложением данных. Полученные в результате исходные

данные оказались неполные, особенно в Балтийском море. В связи с этим для улучшения ситуации было необходимо использовать альтиметрические измерения ИСЗ ERS-1, которые были пересчитаны по данным гравиметрии. После получения и анализа упомянутых данных на следующем этапе работы по средствам специальной программы GRAVSOFТ был рассчитан государственный гравиметрический геоид в различных комбинациях. Сравнивая различные решения модели геоида, в которых использован различный объем гравиметрических данных, делаем вывод, что включение альтиметрических данных в моделирование геоида, дает нам улучшение точности на 1,3 см.