



плані, 10 см по висоті;

- фактична точність RTK-вимірювань не збігається із задекларованою у програмному забезпеченні контролера роверного комплекту;

- чіткої залежності якості й швидкості фіксованих розв'язків від збільшення відстаней від 50 до 100 км між базовою станцією і ровером не виявлено;

- мережевий розв'язок однозначно дає надійніший результат.

Проведені дослідження базувались на вимірах одностемного ровера (лише GPS). Безумовно, при використанні мультисистемного ровера (GPS+GLONASS) кількість даних для розв'язків суттєво зростає. Це однозначно покращить швидкість отримання фіксованого розв'язку, а щодо якості – потрібні додаткові дослідження.

Література

1. *Евстафьев, О.* Наземная инфраструктура для точного позиционирования [Текст] / О. Евстафьев // Геопрофи. – 2008. – № 1. – С. 21-24; № 2. – С. 24-28; № 3. – С. 15-18.

2. *Савчук, С.* Перша мережа активних референцих станцій в Україні ZAKPOS. Етапи становлення та початок діяльності [Текст] / С. Савчук, І. Проданець, І. Калинич // Геопрофіль. – 2010. – № 1. – С. 16-23.

Інтернет-джерела

3. *EPN* – Європейська перманентна мережа. – <http://www.epncb.oma.be/>

4. *Сайт* фірми "Tallysman Wireless". – www.tallysman.com

5. *Сайт* фірми "Trimble". – www.trimble.com

6. *Сайт* фірми "Leica Geosystems". – <http://www.leica-geosystems.com>

7. *Сайт* фірми "Topcon". – <http://www.topconpositioning.com/>

8. *Технічні дані* на GPS-приймач Trimble 5700. – http://www.trimble.com/srv_5700_ds.asp

9. *GNSS-мережа* Західної України – UA-EUPOS/ZAKPOS. – www.zakpos.zakgeo.com.ua

10. *GNSS-мережа* від фірми "Topcon" в Україні. – TNT GNSS Network. – www.net.tnt-tpi.com

11. *GNSS-мережа* Польщі – ASG-EUPOS. – www.asgeupos.pl

12. *GNSS-мережа* Словаччини – SKPOS. – www.skpos.gku.sk

13. *GNSS-мережа* Румунії – ROMPOS. – www.rompos.ro

14. *GNSS-мережа* Угорщини – GNSSnet.hu. – www.gns-snet.hu

15. *Schrock, G.* The Birthplace of VRS [Text] / G.Schrock // The American Surveyor Magazine Online. – Vol. 7. – No. 3 – <http://www.amerisurv.com/content/view/7259/153/>

16. *Standards and Guidelines* EUPOS. – <http://www.eu-pos.org>

Надійшла 27.06.12

* * *

УДК 528.21/22(477)

О. В. Кучер, О. М. Марченко, Д. О. Марченко, І. М. Заєць

ПРО ВИКОРИСТАННЯ ГЛОБАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ EGM08 ТА EGG08 ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТ КВАЗІГЕОЇДА НА ТЕРИТОРІЮ УКРАЇНИ

Вопрос построения квазигеоида по данным GPS-нивелирования тесно связан с определением фигуры Земли и ее внешнего гравитационного поля как основной задачи геодезии. В статье проанализированы современные модели квазигеоида в виде наборов гармонических коэффициентов EGM08 (до 2 190-й степени/порядка), региональную модель Европейского квазигеоида EGG08 на сетке 1'x1', модель украинского квазигеоида УКГ2007 на сетке 2'x3' и значения квазигеоида на пунктах GPS-нивелирования. Доказана нецелесообразность использования глобальных моделей гравитационного поля для решения высокоточных задач геодезии.

Quasigeoid determination on the basis of GPS leveling data is closely related to determination of the Earth's figure and exterior field of terrestrial gravitation as the main task of geodesy. The paper is focused on the comparison of modern quasigeoid models as the sets of EGM08 harmonics coefficients (up to degree/order 2190), regional model of European quasigeoid EGG08 at 1'x1' regular grid, model of Ukrainian quasigeoid UQG2007 at 2'x3' regular grid and GPS leveling quasigeoid values. It is proved the inexpediency of using global gravity models for solution of high-precision tasks of geodesy.

Вступ. Нині усе помітнішою стає тенденція до використання даних глобальних моделей гравітаційного та магнітного полів для цивільних потреб. Практика засвідчує: значення трансформант глобальних моделей можуть суттєво відрізнятися від результатів вимірювань. Мета даної статті – про-

ведення порівняльного аналізу вимірних значень висот квазігеоїда за даними GPS-нівелювання, регіональної моделі квазігеоїда для території України, глобальної моделі гравітаційного поля Землі EGM08 [11] та моделі Європейського квазігеоїда EGG08 [12, 13].

Використання для побудови квазігеоїда даних GPS-нівелювання [6], враховуючи їх зв'язок з геометричним нівелюванням різних класів, зумовлює

© О. В. Кучер, О. М. Марченко,
Д. О. Марченко, І. М. Заєць, 2012



необхідність оцінювання абсолютної точності результатів GPS-нівелювання. Знаючи СКП визначення геодезичної висоти із GPS-вимірювань та нормальних висот із результатів геометричного нівелювання, достатньо при цьому просто оцінити загальну похибку виміряних висот квазігеоїда за формулою Молоденського [2,4,5]. Однак ситуація суттєво ускладнюється тим, що СКП результатів нівелювання традиційно оцінюється, виходячи із довжини ходу нівелювання. Саме тому для проведення розрахунків нами було прийнято рішення здійснити незалежне безпосереднє оцінювання загальної похибки виміряних висот квазігеоїда з використанням стандартного критерію 3σ шляхом накладання даних GPS-нівелювання на моделі квазігеоїда Європи та глобального гравітаційного поля EGM08.

З історії побудови моделей європейських квазігеоїдів EGG97, EGG08 та глобальної моделі гравітаційного поля EGM08. З 1990 по 2008 р. Інститут геодезії (Institut für Erdmessung (IFE)) у місті Ганновер (Німеччина) діяв як обчислювальний центр Міжнародної асоціації геодезії в рамках Комісії з питань побудови гравіметричної моделі геоїда для території Європи. Результатом такої діяльності стала побудова кількох моделей квазігеоїда. Однак для масових користувачів фактично була доступна лише одна модель – EGG97 (Європейський гравіметричний геоїд 1997 р.) [3].

Геоїд і квазігеоїд моделі EGG97 побудовано з використанням високоточних гравіметричних даних, а також глобальної моделі геопотенціалу EGM96 з NASA/NIMA ($L_{\max}=360$) [10]. Використано близько 3 млн гравіметричних вимірів, які тоді були з роздільною здатністю 10 км, та цифрові моделі рельєфу різної точності. Крім того, до опрацювання було включено дані альтиметрії в морських районах. Таке поєднання наборів даних дало можливість отримати комбінований розв'язок на базі відомої техніки "видалення-відновлення". Модель EGG97 [3] побудована на сітці з кроком $1,0' \times 1,5'$, а також $10' \times 15'$, що охоплювала територію від 25° N до 77° N і 35° W до $67,4^\circ$ E.

Порівняння моделі EGG97 і даних GPS-нівелювання чітко показало наявність похибок довгохвильового характеру з магнітудою від 0,1 до 1,0 ppm, а на коротших відстанях (до 100 км) – на рівні 1-2 см при задовільній якості вихідних даних. Обчислення з використанням оновлених моделей гравітаційного поля і моделей геопотенціалу, отриманих із супутникової місії GRACE, значно покращило його

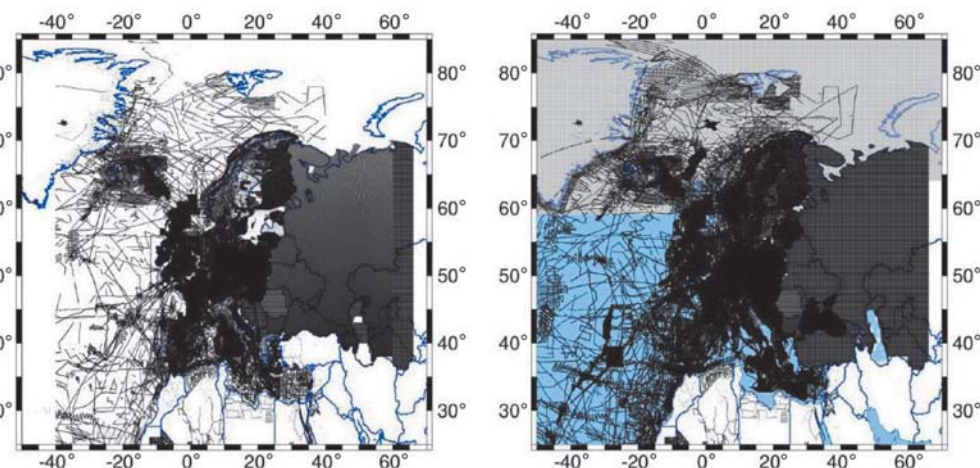
точність – на рівні 3-5 см у місцях з якісними вхідними даними. Крім того, систематичні похибки визначення квазігеоїда можуть бути змодельовані з використанням емпіричної корекції його поверхні порівнянням отриманих результатів з даними GPS-нівелювання. Такий підхід дає можливість обчислити референсні висоти квазігеоїда із сантиметровою точністю. Конкретним прикладом такого підходу є комбінована модель квазігеоїда GCG2005 для території Німеччини.

Наступним кроком у створенні моделі Європейського квазігеоїда можна вважати побудову моделі EGG07 [13], для чого залучались нові й точніші дані гравіметрії про сучасний стан гравітаційного поля Землі, отримані з супутникових місій CHAMP і GRACE, нові дані супутникової альтиметрії та GPS-нівелювання.

Попередні результати опрацювання цих даних презентувалися на щорічних конференціях EGGP (European Gravity and Geoid Project). Модель оновленого квазігеоїда EGG07 була наслідком чотирирічної діяльності EGGP (2003-2007 рр.). Точність моделі, яка доповнена незалежними даними GPS-нівелювання, значно зросла порівняно з точністю попередньої моделі.

При об'єднанні наборів даних основну увагу приділяли ретельній перевірці наявності в них систематичних і грубих помилок. Це був один з найбільш трудомістких етапів роботи. Розподіл вихідної гравіметричної інформації зображено на мал. 1. Зліва на ньому зображено розташування вихідної інформації, використаної для побудови EGG97, справа – оновлений набір гравіметричних даних станом на липень 2007 р., використаний для побудови EGG07.

Алгоритм створення моделі EGG07 детально описано в праці [13]. Для обчислення висот квазігеоїда застосовувалась техніка "видалення-відновлення". Моделювання гравітаційного поля ґрунтувалось на поєднанні спектрального аналізу з інтегральними формулами, що дало змогу провести розрахунки з використанням ефективного



Мал. 1. Розподіл значень вихідних аномалій сили тяжіння Δg для побудови моделей Європейського квазігеоїда EGG97 (зліва) та EGG07 (справа) [3, 13]

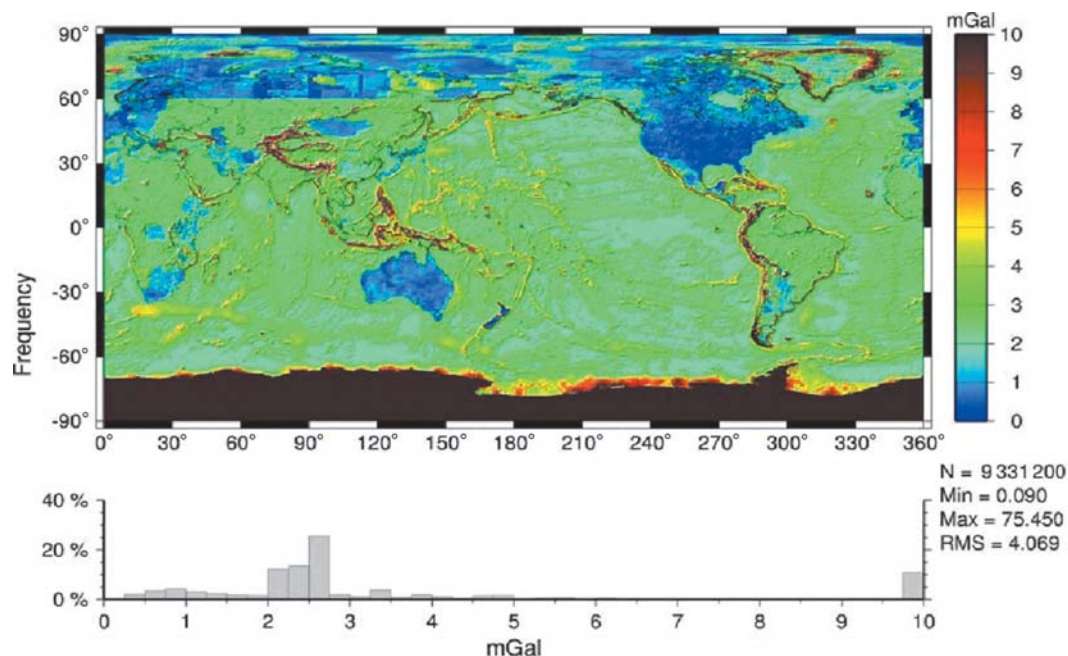


методу одомірного швидкого перетворення Фур'є [13]. Поєднання наземних гравіметричних даних з даними глобальних моделей геопотенціалу виконувалось шляхом уведення спектральних вагових коефіцієнтів, які залежали від точності вхідних наборів даних. Зауважимо, що глобальні моделі геопотенціалу краще описують довгохвильові компоненти квазігеоїда, тоді як дані наземного знімання – короткохвильові складові.

Остаточний набір гравіметричних даних для обчислення EGG07 містив 5 354 563 точкових даних результатів спостережень із 709-ти джерел. Використання глобальних моделей геопотенціалу, побудованих за даними місії GRACE, значно покращило картину, порівняно з глобальною моделлю EGM96.

СКП різниць між гравіметричним квазігеоїдом і даними GPS-нівелювання добре узгоджуються (на рівні 2-3 см) із внутрішньою точністю геоїдів, побудованих з використанням глобальних моделей гравітаційного поля Землі GRACE. Така точність EGG07 для великих частин території Європи є на сьогодні оптимальною, тобто такою, на яку можна очікувати з використанням сучасних гравіметричних даних, даних цифрових моделей рельєфу та глобальної моделі гравітаційного поля GRACE. Подальшого покращення цієї моделі можна очікувати з появою моделей гравітаційного поля супутникової місії GOCE та більшої кількості уточненої гравіметричної інформації на території більшості країн Європи.

Найсучаснішою комбінованою глобальною моделлю надвисокого ступеня є модель EGM2008 [11], побудована в Національній геопросторово-розвідувальній агенції США (U.S. National Geospatial-Intelligence Agency (NGA)) групою розробників EGM Development Team. Ця модель гравітаційного поля містить коефіцієнти сферичних гармонік до 2 160-го ступеня і порядку. За основу було взято значення на сітці 5'×5', які в свою чергу були отримані з прогнозу наземних даних аномалій сили тяжіння на основі моделі PGM2007B. Також незалежно оброблялися аномалії Δg , отримані з інверсії альтиметричних даних. У результаті було одержано нову комбіновану сітку 5'×5' аномалій сили тяжіння в глобальному масштабі. Мал. 2. ілюструє оцінку точності аномалій сили тяжіння, обчислених на сітці 5'×5'.



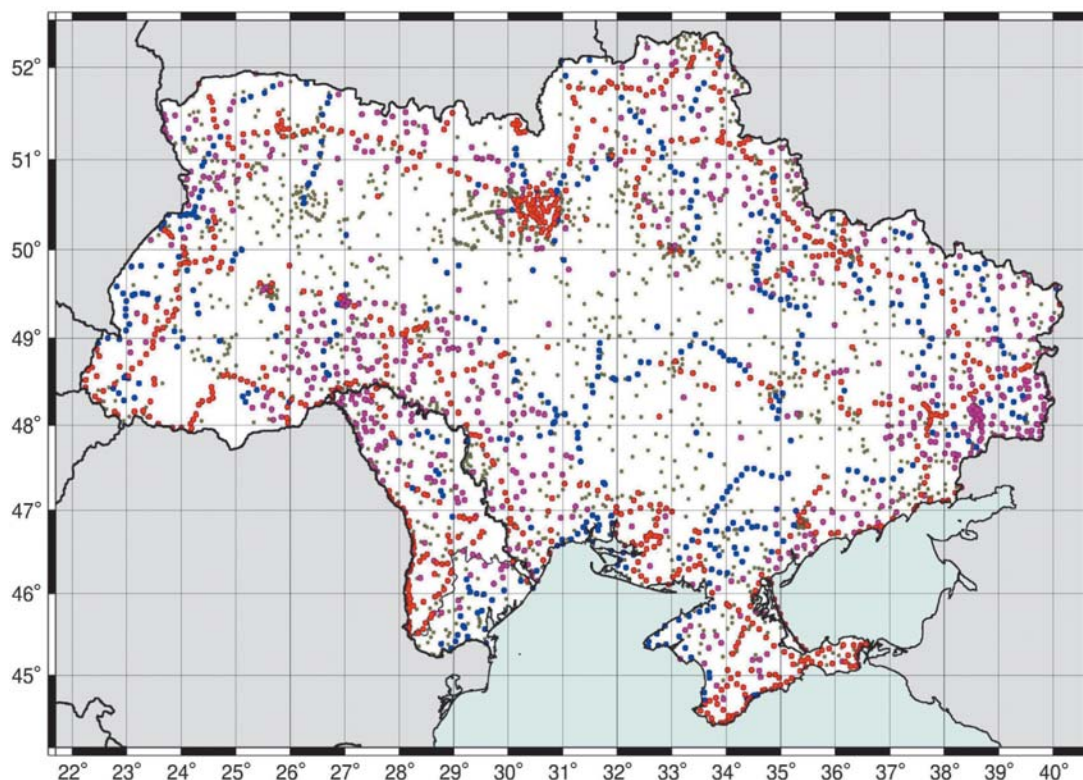
Мал. 2. Оцінювання точності Δg моделі EGM08 з відповідним частотним аналізом [11]

Опис моделі квазігеоїда УКГ2007. Порівняння різних версій Європейського квазігеоїда з даними GPS-нівелювання. У 2007 р. було поставлено й розв'язано [9] задачу побудови Українського квазігеоїда (УКГ2007) зі стандартним відхиленням $\sigma < 10$ см за довільно заданими 159 187-ма аномаліями сили тяжіння Δg в регіоні України, 20 844-ма значеннями Δg і 20 844-ма висотами геоїда на гріді 2'×2', одержаними за даними 6-ти альтиметричних місій ERS-1, ERS-2, TOPEX/POSEIDON, GFO, ENVISAT і JASON-1 в акваторіях Чорного і Азовського морів (загальний інтервал вимірювань – близько 14-ти років) [1], а також за даними GPS-нівелювання 2 381-го пункту та за інформацією про топографію з різних джерел, яка в остаточному вигляді являла собою цифрову модель місцевості SRTM3 з роздільною здатністю 1"×1". При побудові УКГ2007 використано метод середньої квадратичної колокації [4,5,7,8] для прогнозування висот квазігеоїда та аномалій сили тяжіння на регулярну сітку 2'×3'.

Оскільки кількість пунктів GPS-нівелювання з 2007 р. по 2011 р. збільшилась від 2 381-го до 3 627-ми (тобто на 1 246), розподіл яких ілюструє мал. 3, перелічені гравіметричні розв'язки EGG08, EGM08 і УКГ2007 дають змогу провести додаткову незалежну перевірку цих статистик.

Табл. 1-3 демонструють статистики різниць виміряних GPS-висот квазігеоїда та розв'язків EGG08, EGM08 і УКГ2007. Їх аналіз дає змогу констатувати:

- з точки зору середнього і стандартного відхилення найкращим розв'язком слід вважати квазігеоїд УКГ2007. В усіх випадках ми отримуємо $\sigma < 8$ см;
- квазігеоїд EGG08 прив'язано до Амстердамського футштока, через що маємо середнє відхилен-



Мал. 3. Розподіл 3 627 пунктів GPS-нівелювання I (●), II (●), III (●) і IV (●) класів

ня в 25 см відносно реперів, заданих у Балтійській 1977 р. системі;

- розв'язки УКГ2007 і EGM08 характеризуються близьким до нульового значення середнього відхилення відносно реперів, заданих у Балтійській 1977 р. системі, але стандартне відхилення показує, що пряме застосування моделі EGM08 для вирішення задач високого рівня точності неможливе;

- модель EGM08 на території України характерна тим, що для всіх класів GPS-нівелювання її стандартне відхилення становить ~1 дм. На мал. 4 вказано різниці значень глобальної моделі EGM08 та пунктів GPS-нівелювання.

Висновки. Практичне використання моделей гравітаційного поля EGM08 та EGG08 для визначення висот квазігеоїда та нормальних висот у Балтійській системі 1977 р. методом GPS-нівелювання пов'язане з деякими проблемами, які потребують вирішення:

1. Обидві моделі не ув'язані з Балтійською системою висот 1977 р. і тому дають розбіжності у визначенні висот квазігеоїда від -0,30 м до +0,60 м у межах України, що не дозволяє визначати нормальні висоти точок навіть на рівні нівелювання IV класу.

2. Не завершено роботи з приєднання Державної нівелірної мережі України до Об'єднаної євро-

Таблиця 1. Статистики різниць вимірних GPS-висот квазігеоїда та розв'язку EGG08, см

| Статистики | Пункти GPS-нівелювання відповідного класу/кількість | | | | |
|------------------------|---|-------------|--------------|--------------|------------|
| | I (737 п.) | II (446 п.) | III (642 п.) | IV (1803 п.) | Всі пункти |
| Мінімальне відхилення | -14,4 | -0,0 | -13,0 | -17,9 | -17,9 |
| Максимальне відхилення | 54,3 | 55,9 | 64,5 | 68,6 | 68,6 |
| Середнє відхилення | 25,1 | 25,6 | 26,7 | 24,2 | 25,1 |
| Стандартне відхилення | 8,2 | 7,9 | 10,3 | 9,5 | 9,3 |

Таблиця 2. Статистики різниць вимірних GPS-висот квазігеоїда та розв'язку EGM08, см

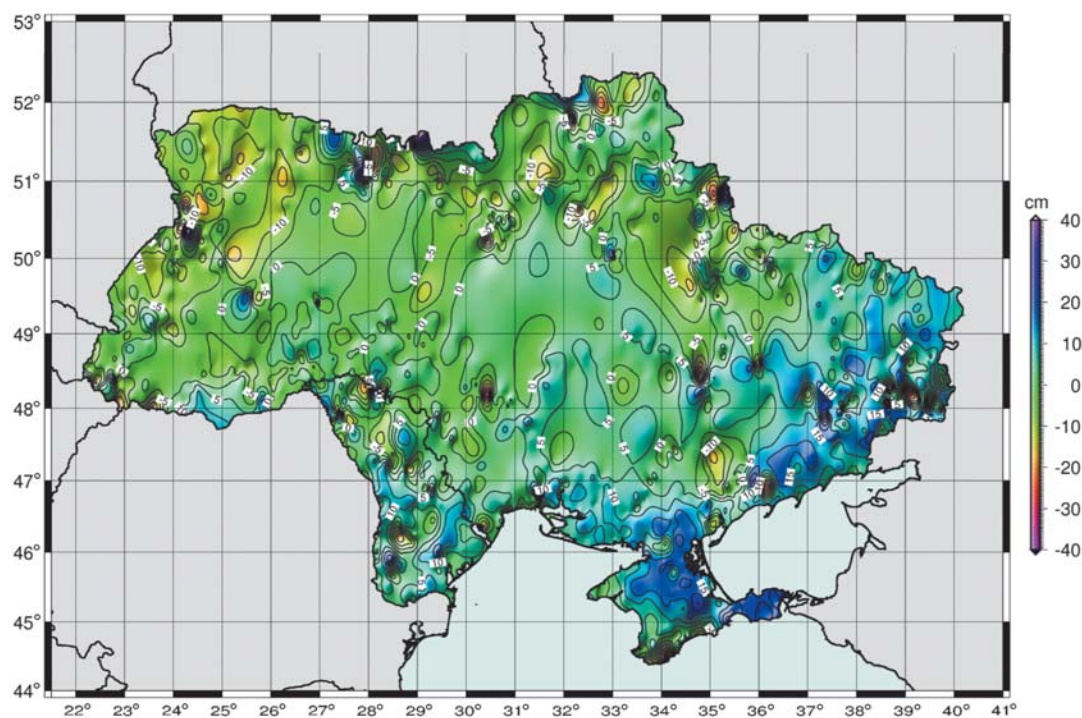
| Статистики | Пункти GPS-нівелювання відповідного класу/кількість | | | | |
|------------------------|---|-------------|--------------|--------------|------------|
| | I (737 п.) | II (446 п.) | III (642 п.) | IV (1803 п.) | Всі пункти |
| Мінімальне відхилення | -38,5 | -30,3 | -34,2 | -41,7 | -41,7 |
| Максимальне відхилення | 33,4 | 29,1 | 37,0 | 45,3 | 45,3 |
| Середнє відхилення | 1,4 | 1,3 | 2,0 | -0,2 | 0,7 |
| Стандартне відхилення | 9,2 | 7,9 | 9,5 | 9,5 | 9,3 |

Таблиця 3. Статистики різниць вимірних GPS-висот квазігеоїда та розв'язку УКГ2007, см

| Статистики, см | Пункти GPS-нівелювання відповідного класу/кількість | | | | |
|------------------------|---|-------------|--------------|--------------|------------|
| | I (737 п.) | II (446 п.) | III (642 п.) | IV (1803 п.) | Всі пункти |
| Мінімальне відхилення | -38,0 | -35,8 | -37,8 | -44,6 | -44,6 |
| Максимальне відхилення | 48,0 | 39,9 | 50,9 | 35,7 | 50,9 |
| Середнє відхилення | -0,8 | -0,7 | -1,0 | -1,7 | -1,2 |
| Стандартне відхилення | 6,3 | 7,9 | 8,2 | 8,0 | 7,7 |

пейської нівелірної мережі, не введено систему висот EVRS2000 (Європейська вертикальна референсна система 2000 р.).

3. Для ефективного використання методу GPS-нівелювання необхідно завершити побудову моде-



Мал. 4. Різниці між висотами квазігеоїда моделі EGM08 та даними GPS-нівелювання, см

лі квазігеоїда для території України, ув'язавши її із європейською системою висот та глобальними моделями гравітаційного поля EGM08 та EGG08.

Література

1. *Марченко, О.М.* Визначення середніх рівнів Балтійського і Чорного морів та їх змін у часі [Текст] / О.М. Марченко, Н.П. Ярема // Вісн. геодез. та картогр. – 2006. – № 6. – С. 2-9.
2. *Молоденский, М.С.* Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли [Текст] / М.С. Молоденский, В.Ф. Еремеев, М.И. Юркина // Тр. ЦНИИГАиК. – 1960. – Вып. 131. – 251 с.
3. *Denker, H.* The European Gravimetric Quasigeoid EGG97 – An IAG supported continental enterprise [Text] / H. Denker, W. Torge // In: IAG Symposium "Geodesy on the Move – Gravity Geoid, Geodynamics, and Antarctica". – Proceedings, Springer Verlag, 1997. – Vol. 119. – P. 249-254.
4. *Heiskanen, W.A.* Physical Geodesy [Text] / W.A. Heiskanen, H. Moritz. – San Francisco, 1967. – 364 p.
5. *Hofmann-Wellenhof, B.* Physical Geodesy [Text] / B. Hofmann-Wellenhof, H. Moritz. – Wien; New York: Springer, 2005. – 403 p.
6. *Kearsley, A. H. W.* Practical evaluation of the gravimetric geoid for GPS heighting. Section 2, Geoid Heights by Ring Integration. IGES International Geoid School [Text] / A. H. W. Kearsley. – Thessaloniki, Greece, 31 August to 5 September, 2002.
7. *Marchenko, A.N.* Parameterization of the Earth's Gravity Field [Text] / A.N Marchenko. – Lviv: Lviv Astro-
8. *Marchenko, A.N.* A classification of reproducing kernels according to their functional and physical significance [Text] / A.N. Marchenko, D.A. Lelgemann // IGES Bulletin. – Milan, 1998. – No 8. – P. 49-52.
9. *Marchenko, A.* On the quasigeoid solutions for the Ukraine and Moldova area [Text] / A. Marchenko, O. Kucher // Paper presented at the EUREF Symposium, Brussels, June, 2008 / This contribution available in: <http://www.euref.eu/symposia/2008Brussels/Symposium2008-Brussels.html>
10. *NIMA WGS84 Update Committee* Department of Defense World Geodetic System 1984. – Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems // National imagery and mapping agency (NIMA), Technical report, 1997.
11. *Pavlis, N. K.* An Earth gravitational model to degree 2160: EGM2008 [Text] / N. K. Pavlis, S. A. Holmes, S. C. Kenyon, J. K. Factor // EGU General Assembly, Vienna, 2008. – 17 p.
12. *Schwarz, K.P.* The Use of FFT techniques in physical geodesy [Text] / K.P. Schwarz, M.G. Sideris, R. Forsberg // Geophysical Journal International. – 1990. – Vol. 100. – P. 485-514.
13. *Denker, H.* The Development of the European Gravimetric Geoid Model EGG07 [Text] / H. Denker, J.-P. Barriot, R. Barzaghi [et al.]; M.G.Sideris (ed.) // Observing our Changing Earth, Int. Assoc. of Geodesy, Symp. 132. – Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, 2009. – P. 177-186.
14. *Supplement* to department of defence world geodetic system 1984 technical report // DMA technical report DMA TR 8350.2-B, 1987. – 171 p.

Надійшла 30.07.12