

УДК 528.21

Ф. ЗАБЛОЦЬКИЙ, Б. ДЖУМАН, І. БРУСАК

Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел. +38(068)7632139, ел. пошта teojuman@gmail.com

ПРО ТОЧНІСТЬ МОДЕЛЕЙ (КВАЗІ)ГЕОІДА ВІДНОСНО СИСТЕМИ ВИСОТ UELN/EVRS2000

Сьогодні в Україні діє Балтійська система висот 1977 р., вихідним пунктом якої слугує нуль Кронштадтського футштока. Проте чинна в Україні система висот є застарілою, передусім через велику віддаленість від нуль-пункту відліку висот (близько 2 тис. км) і складність адаптації до використання методів супутникової геодезії. Тому нині вона не відповідає рівню розвитку сучасних геопросторових технологій і її необхідно модернізувати. Найоптимальнішим способом модернізації висотної мережі України є її інтеграція в Об'єднану європейську нівелірну мережу UELN, нуль-пунктом якої слугує Амстердамський футшок. Для такої інтеграції необхідно побудувати високоточну модель геоїда на території України, пов'язану з системою висот UELN/EVRS2000. **Мета.** Мета цієї роботи полягає у порівнянні точності різних моделей геоїда/квазігеоїда та глобального гравітаційного поля Землі на частину прикордонної території Західної України відносно висот пунктів у системі висот UELN/EVRS2000, на яких виконано GNSS-нівелювання, та визначенні оптимальної моделі, щодо якої можна побудувати високоточну модель геоїда, узгоджену із системою висот UELN/EVRS2000. **Методика.** Для отримання висот нівелірних пунктів на території України у системі висот UELN/EVRS2000 виконано нівелювання I класу за двома лініями від фундаментальних реперів на території України (висоти яких відомі у Балтійській системі висот 1977 р.) до реперів високоточного нівелювання на території Польщі (висоти яких відомі у системі висот UELN/EVRS2000). На всіх фундаментальних та ґрунтових реперах, а також горизонтальних марках виконано GNSS-нівелювання у статичному режимі (не менше ніж 6 год щосекундних безперервних спостережень). **Результати.** На підставі виконаних вимірювань отримано висоти квазігеоїда на 26 пунктах. Їх порівняно із трьома глобальними моделями гравітаційного поля Землі: EGM2008, EIGEN-6C4 та XGM2019e_2159 (максимальний порядок перелічених моделей становить 2190), а також із Європейським геоїдом EGG2015. Встановлено, що найвищу точність (≈ 7 см) дає змогу отримати європейський геоїд EGG2015. **Наукова новизна і практична значущість.** Вперше досліджено точність моделей гравітаційного поля Землі та моделей геоїда на території України на пунктах, на яких відома висота у системі висот UELN/EVRS2000. Встановлено, що для побудови високоточного квазігеоїда із використанням процедури “Вилучення – Відновлення” найкраще використовувати європейський геоїд EGG2015 як систематичну складову.

Ключові слова: європейський геоїд; український квазігеоїд; система висот.

Вступ

Сьогодні в Україні діє Балтійська система висот 1977 р., початковим пунктом якої слугує нуль Кронштадтського футштока. Для повноцінного функціонування будь-якої висотної системи потрібно оперувати високоточною моделлю геоїда/квазігеоїда на відповідну територію, що є не тільки важливою складовою основної задачі геодезії, але й уможливорює використання сучасних високоточних супутникових технологій для отримання ортометричних/нормальних висот. Нині можна виділити багато моделей геоїда/квазігеоїда та глобального гравітаційного поля Землі, які побудовані на територію України або її охоплюють. Можна виділити три основні групи цих моделей: 1) український квазігеоїд УКГ, реалізований в 2006, 2007, 2011, 2012 та 2016 рр. лише на територію України; 2) гло-

бальні моделі гравітаційного поля Землі; 3) європейський гравіметричний геоїд EGG, реалізований у 1997, 2007 та 2015 рр.

У роботах [Кучер, 2012; Марченко та ін., 2007; Марченко та ін., 2013; Marchenko et. al., 2015; Дзуліт & Голубінка, 2009] детально проаналізовано точність більшості перелічених нижче моделей на основі їх порівняння із даними GNSS-нівелювання на пунктах Державної геодезичної мережі (ДГМ). Встановлено, що найвищу точність на територію України забезпечує модель квазігеоїда УКГ2016.

Проте чинна в Україні система висот морально застаріла, насамперед через велику віддаленість від нуль-пункту відліку висот (близько 2 тис. км) і складність адаптації до використання методів супутникової геодезії. Тому вона сьогодні не відповідає рівню розвитку

сучасних геопросторових технологій і її необхідно модернізувати.

На нашу думку, оптимальним способом модернізації висотної мережі України є її інтеграція в Об'єднану європейську нівелірну мережу UELN [Sacher et. al., 2006], нуль-пунктом якої слугує Амстердамський футшток. Це забезпечить входження України в європейську економічну систему, участь у міжнародних наукових дослідженнях глобальних екологічних і геодинамічних процесів, вивчення фігури Землі й гравітаційного поля та картографування території України із використанням супутникових технологій. Задля такої інтеграції необхідно побудувати високоточну модель геоїда на територію України, пов'язану із системою висот UELN/EVRS2000 [Sacher et. al., 2007].

Мета

Мета цієї роботи полягає у порівнянні точності різних моделей геоїда/квазігеоїда та глобального гравітаційного поля Землі на частину прикордонної території Західної України відносно висот пунктів у системі висот UELN/EVRS2000, на яких виконано GNSS-нівелювання, та визначенні найоптимальнішої моделі, щодо якої можна побудувати високоточну модель геоїда, узгоджену із системою висот UELN/EVRS2000.

Методика

Для отримання висот нівелірних пунктів на території України у системі висот UELN/EVRS2000 виконано нівелювання I класу від фундаментальних реперів

на території України (висоти яких відомі у Балтійській системі висот 1977 р.) до реперів високоточного нівелювання на території Польщі (висоти яких відомі у системі висот UELN/EVRS2000) за двома лініями: Львів – Шегині – Перемишль та Ковель – Ягодин – Хелм. Схему цих ліній нівелювання подано на рис. 1–2.

Середня квадратична систематична похибка по обох лініях нівелювання становить <0,01 мм. Своєю чергою, середня квадратична випадкова похибка по лінії Львів – Шегині – Перемишль дорівнює 0,29 мм, а по лінії Ковель – Ягодин – Хелм – 0,27 мм. Після урівноваження результатів вимірювань отримано висоти нівелірних пунктів у двох системах висот: Балтійській системі висот 1977 р. та європейській системі висот UELN/EVRS2000.

На всіх фундаментальних та ґрунтових реперах, а також горизонтальних марках виконано GNSS-нівелювання за точністю мереж 2 класу. Вимірювання виконано GNSS-приймачами фірм Leica та South (рис. 3), вони передбачали безперервні спостереження впродовж мінімум 6 год у статичному режимі із частотою отримання розв'язків 1 с. Опрацювання даних виконано у програмному пакеті Leica Geo Office щодо перманентних GNSS-станцій мережі “Геотерраса”, які входять до ДГМ. Координати визначених у системі ITRF 2000 (2005) нівелірних пунктів подано в табл. 1. Середня квадратична похибка визначення геодезичної висоти, отриманої за допомогою GNSS-нівелювання у статичному режимі, не перевищувала 20 мм.

Таблиця 1

Планові координати нівелірних пунктів у системі ITRF 2000 (2005)

Назва	B °	L °	Назва	B °	L °
14	49,794322	23,448349	A2714	49,835730	23,962483
A0124	49,807671	23,330736	A4806	49,807323	23,331684
A0637	49,831819	23,717717	Zatoka	49,843033	23,661699
A0705	49,815255	23,120042	5290	49,808484	23,923948
A0739	49,803525	22,974543	6315	51,228552	24,186615
A0788	49,789236	23,551068	A0039	51,210828	23,989612
A0871	49,803390	22,975361	A0102	51,224109	24,140755
A0989	49,816250	23,034981	A2546	51,201146	23,939055
A1499	49,785671	23,574987	A0837	51,231290	24,218644
A1951	49,793390	23,461353	1712	51,230388	24,687897
A2030	49,825730	23,204272	A0147	51,242941	24,339085
A2562	49,835930	23,913584	A0273	51,189997	23,812648
A2618	49,783831	23,587793	Вовчий перевіз	51,189997	23,812273

Результати

Виконавши вимірювання, отримали висоти квазігеоїда на 26 точках із використанням відомої формули:

$$= H - H^y, \quad (1)$$

де ζ – висота квазігеоїда; H – геодезична висота; H^y – нормальна висота. Оскільки офіційною референсною

системою, відносно якої відповідно до резолюції Міжнародного геодезичного та геофізичного союзу (IUGG) рекомендовано будувати розв'язки геоїда/квазігеоїда, є Глобальна референсна система GRS80, всі геодезичні висоти переведено саме в цю систему. На рис. 4 зображено карту отриманих висот квазігеоїда.

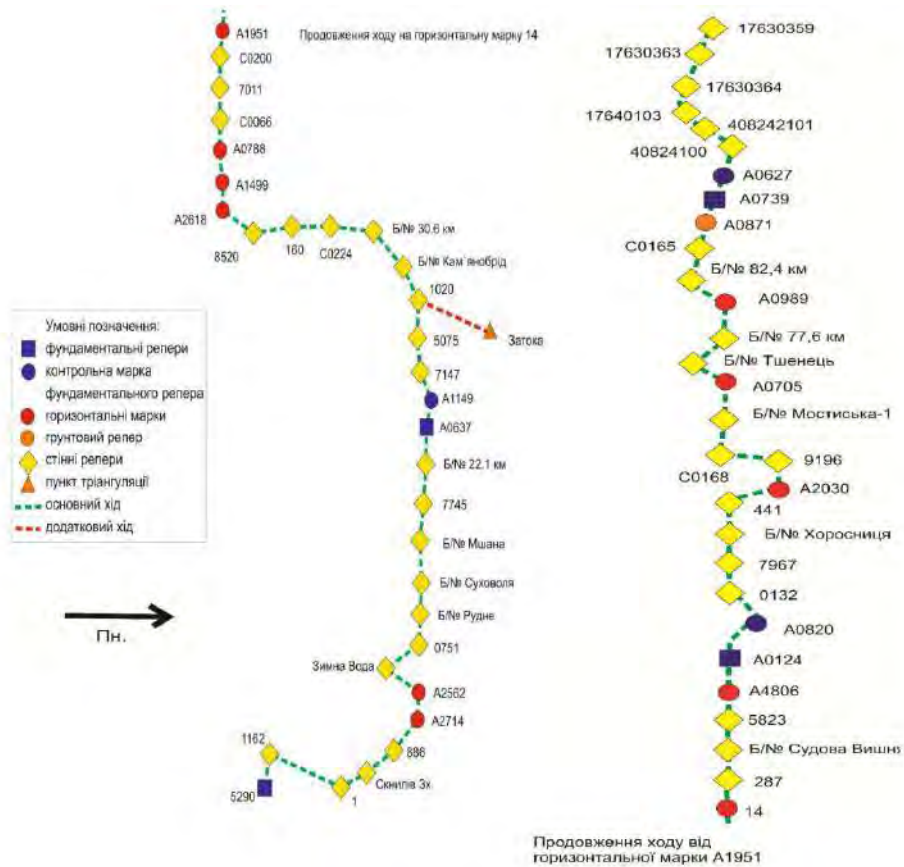


Рис. 1. Схема нівелірної лінії I класу Львів – Шегині – Перемишль

Fig. 1. Scheme of I class leveling line Lviv – Shehyni – Przemysl

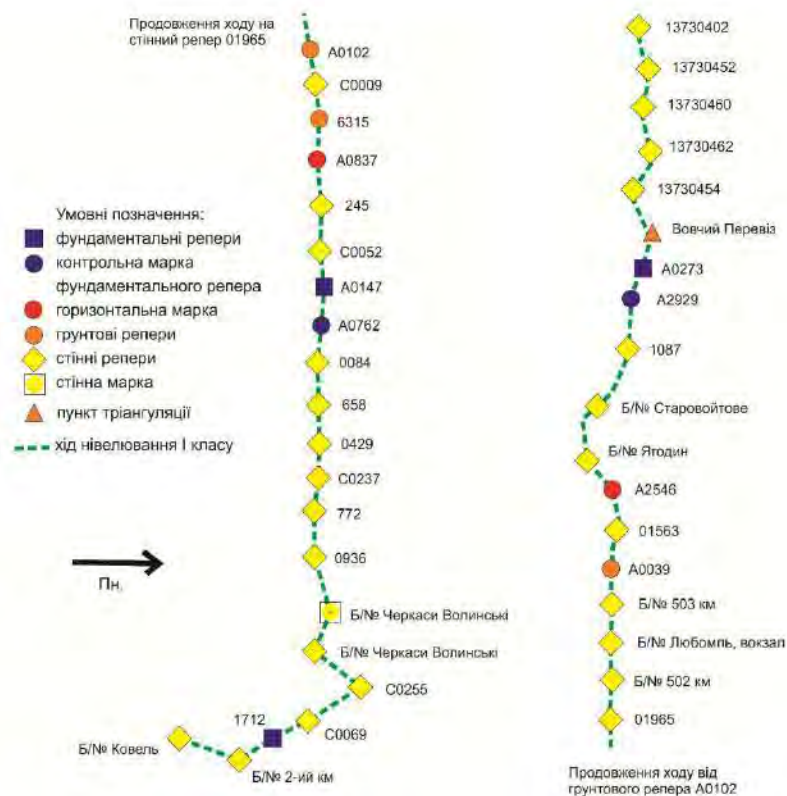


Рис. 2. Схема нівелірної лінії I класу Ковель – Ягодин – Хелм

Fig. 2. Scheme of I class leveling line Kovel – Yagodin – Helm



Рис. 3. GNSS-нівелювання у статичному режимі

Fig. 3. GNSS-leveling in static mode

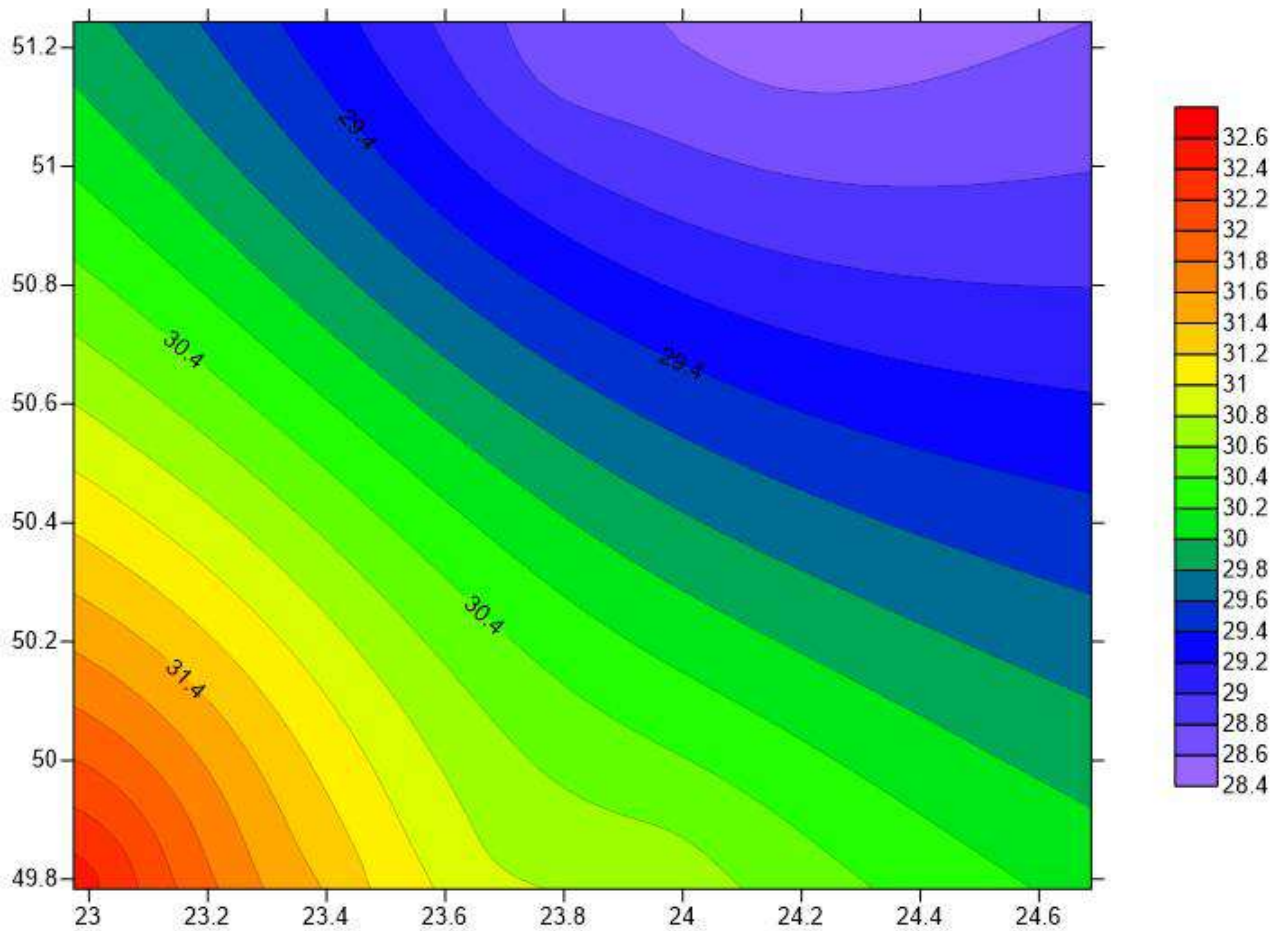


Рис. 4. Карта висот геоїда, отриманих за допомогою геометричного та GNSS-нівелювання

Fig. 4. Map of geoid heights obtained from geometric and GNSS-leveling

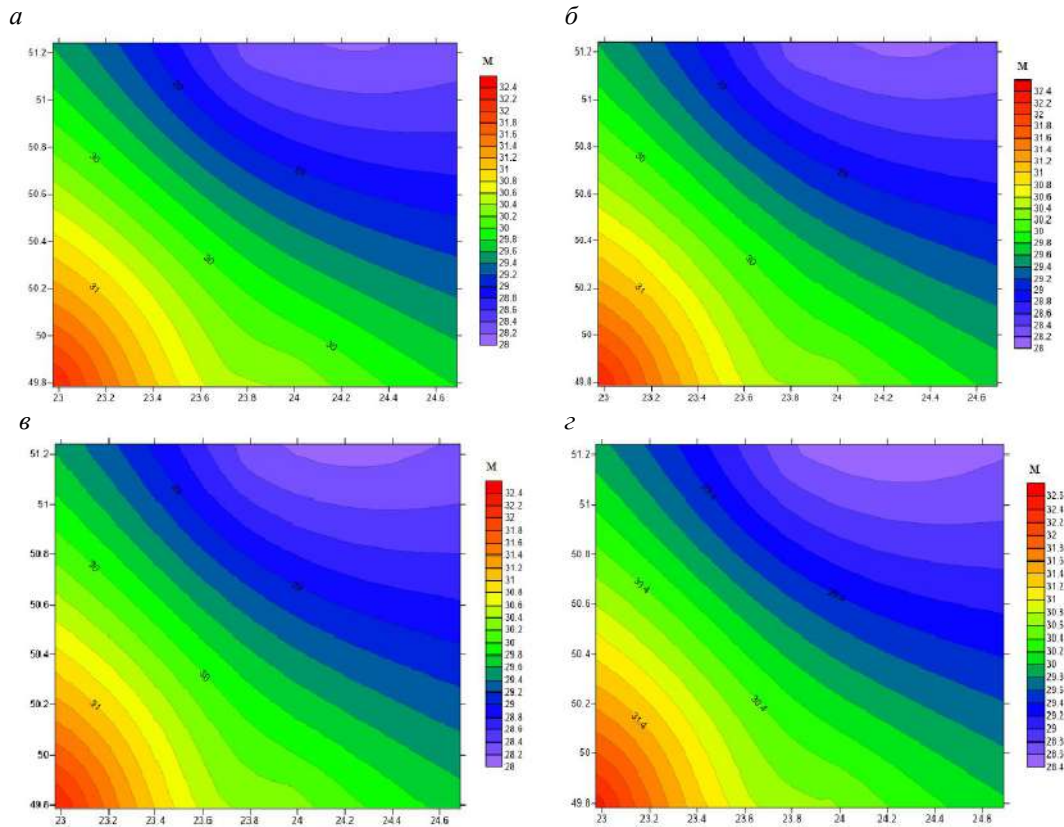


Рис. 5. Карта висот геоїдів, отриманих за моделями: а – EGM2008; б – EIGEN-6C4; в – XGM2019e_2159; з – EGG2015

Fig. 5. Map of the geoids heights obtained by models: а – EGM2008; б – EIGEN-6C4; в – XGM2019e_2159; з – EGG2015

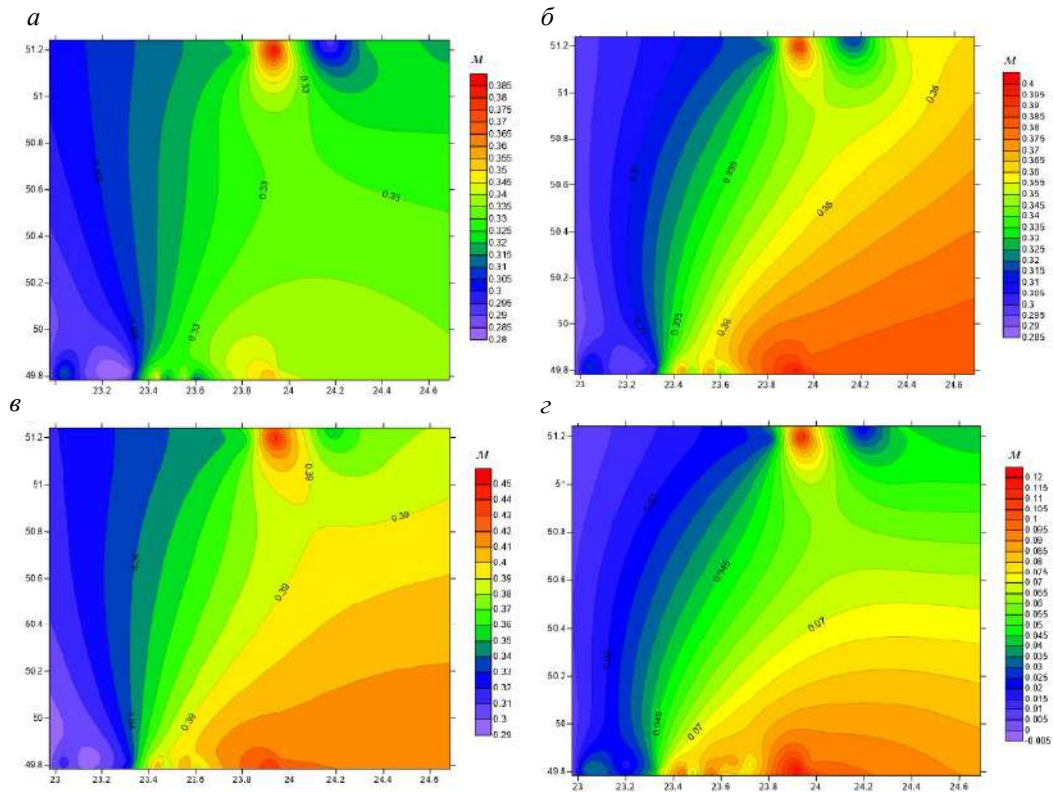


Рис. 6. Карта різниць висот геоїдів, отриманих із вимірів та за моделями:
а – EGM2008; б – EIGEN-6C4; в – XGM2019e_2159; з – EGG2015

Fig. 6. Map of differences of geoids height obtained from measurements and from models:
а – EGM2008; б – EIGEN-6C4; в – XGM2019e_2159; з – EGG2015

Отримані результати порівняно із трьома глобальними моделями гравітаційного поля Землі: EGM2008 [Pavlis et. al., 2008], EIGEN-6C4 [Foerste et. al., 2014] та XGM2019e_2159 [Zingerle et. al., 2019] (максимальний порядок усіх перелічених моделей становить 2190), а також із Європейським геоїдом EGG2015 [Denker, 2015]. Оскільки всі моделі українського квазігеоїда УКГ побудовано відносно Балтійського моря, порівняння результатів

нівелювання із цими моделями некоректне. На рис. 5 зображено карти висот геоїдів, отриманих за моделями EGM2008, EIGEN-6C4, XGM2019e_2159 та EGG2015, а на рис. 6 – різниці між цими висотами та висотами геоїда, одержаними на основі вимірювань.

У табл. 2 подано головні статистики обчислених різниць, такі як мінімальне, максимальне, середнє та стандартне відхилення.

Таблиця 2

Головні статистики різниць висот геоїдів

Різниці	Статистики, м			
	Мінімальне відхилення, м	Максимальне відхилення, м	Середнє відхилення, м	Стандартне відхилення, м
$\zeta_{вим} - \zeta_{EGM2008}$	0,27	0,39	0,32	0,32
$\zeta_{вим} - \zeta_{EIGEN-6C4}$	0,28	0,40	0,34	0,34
$\zeta_{вим} - \zeta_{XGM2019e_2159}$	0,28	0,45	0,37	0,37
$\zeta_{вим} - \zeta_{EGG2015}$	-0,01	0,12	0,06	0,07

Як видно із табл. 2 та рис. 6, із глобальних моделей гравітаційного поля Землі для досліджуваного регіону найкраще підходить модель EGM2008. Проте найвищу точність (≈ 7 см) дає змогу отримати європейський геоїд EGG2015.

Наукова новизна і практична значущість

Вперше досліджено точність моделей гравітаційного поля Землі та моделей геоїда на прикордонній території Західної України на пунктах, для яких відома висота у системі висот UELN/EVRS2000. Встановлено, що для побудови високоточного квазігеоїда із застосуванням процедури “Вилучення – Відновлення” найкраще використовувати як систематичну складову європейський геоїд EGG2015.

Висновки

У результаті виконаної роботи можна зробити такі висновки:

- Ø виконано нівелювання I класу для зв'язку Балтійської та Європейської систем висот і можливості поширення системи висот UELN/EVRS2000 на територію України;

- Ø виконано GNSS-нівелювання на фундаментальних, ґрунтових реперах та горизонтальних марках;

- Ø із використанням отриманих даних побудовано поверхню геоїда на досліджувану прикордонну територію;

- Ø отриману поверхню геоїда порівняно з моделями гравітаційного поля Землі та моделями геоїда;

Ø встановлено, що найменше стандартне відхилення відносно вимірних даних у європейського геоїда EGG2015.

Література

- Двуліт П. Д. & Голубінка Ю. І. (2009). Порівняльна характеристика визначення висот квазігеоїда території України з використанням моделей геоїда/квазігеоїда та гравітаційного поля Землі. *Геодезія, картографія та аерофотознімання*. Львів, 72, С. 27–34.
- Кучер О. В., Марченко О. М., Марченко Д. О., Засць І. М. (2012). Про використання глобальних моделей EGM08 та EGG08 для визначення висот квазігеоїда на території України. *Вісник геодезії та картографії*, No. 4(79), С. 13–17.
- Марченко О. М. Кучер О. В., Ренкевич О. В. (2007). Результати побудови квазігеоїда для регіону України (УКГ-2006). *Вісник геодезії та картографії*, No. 2, С. 3–13.
- Марченко О. М., Кучер О. В., Марченко Д. О. (2013). Результати уточнення квазігеоїда УКГ2012 для території України. *Вісник геодезії та картографії*, No. 3(84), С. 3–10.
- Denker H. (2015). A new European gravimetric (quasi)geoid EGG2015. Poster presented at XXVI General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), Earth and Environmental Sciences for Future Generations, 22 June – 2 July 2015, Prague, Czech Republic.

- Foerste, Christoph; Bruinsma, Sean.L.; Abrikosov, Oleg; Lemoine, Jean-Michel; Marty, Jean Charles; Flechtner, Frank; Balmino, G.; Barthelmes, Franz; Biancale, Richard (2014): EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/icgem.2015.1>
- Marchenko O. N., Kucher O. V., Marchenko D. O. (2015). Regional quasigeoid solutions for the Ukraine area. *Geodynamics*, No. 2(19), pp. 7–14. doi: <https://doi.org/10.23939/jgd2015.02.007>
- Pavlis N., Holmes S., Kenyon S., Factor J. (2008). An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008. *Geophysical Research Abstracts*, 10, EGU2008-A-01891, EGU General Assembly.
- Sacher, M., Ihde, J., Svensson (2006). Status of UELN and Steps on the way to EVRS2007. Presented at the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF) in Riga, June 14–17, 2006. In: *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*, Vol. 40, pp. 57–61, Frankfurt am Main, 2008.
- Sacher, M., Ihde, J., Liebsch, G. (2007). Status of EVRS2007. Presented at the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF) in London, June 6–9, 2007. In: *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*, Vol. 42, pp. 53–57, Frankfurt am Main, 2009.
- Zingerle Ph., Pail R., Gruber Th., Oikonomidou X. (2019). The experimental gravity field model XGM2019e. GFZ Data Services. URL: <http://doi.org/10.5880/ICGEM.2019.007>

F. ZABLOTSKYI, B. DZHUMAN, I. BRUSAK

Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, 6, Karpinsky Str. Lviv, 79013, Ukraine, +38(068)7632139, e-mail teojuman@gmail.com

ON THE ACCURACY OF (QUASI) GEOID MODELS RELATIVELY UELN/EVRS2000 HEIGHT SYSTEMS

Nowadays the Baltic Height System 1977 operates in Ukraine, the starting point of which is the zero of the Kronstadt benchmark. However, the current height system in Ukraine is morally obsolete primarily due to the great distance from the zero-point of height (about 2 thousand km) and the difficulty of adapting to the use of satellite surveying methods. Therefore, today it does not correspond to the level of development of modern geospatial technologies and it needs to be modernized. The most optimal way to modernize the height network of Ukraine is its integration into the United European Leveling Network UELN, the zero point of which is the Amsterdam benchmark. Within the framework of such integration it is necessary to create a high-precision geoid model for the territory of Ukraine, connected to the UELN/EVRS2000 height system. **Aim.** The purpose of the work is to compare the accuracy of different geoid/quasigeoid models and the global gravitational field of the Earth on the Western Ukraine area (border region) relative to the heights of points in the height system UELN/EVRS2000, where GNSS-leveling is performed, and to determine the most optimal model in relation to which a high-precision geoid model can be created, consistent with the UELN/EVRS2000 height system. **Method.** To obtain the heights of leveling points on the Ukraine area in the UELN/EVRS2000 height system we performed I class leveling on two lines from the fundamental benchmarks on the territory of Ukraine (heights are known in the Baltic height system 1977) to I class benchmarks on the Poland area (UELN/EVRS2000 height system). GNSS-leveling in static mode (1-second sampling observations for more than 6 hours) was performed on all fundamental and ground benchmarks, as well as horizontal marks. **Results.** The heights of the quasigeoid at 26 points are obtained from the performed measurements. The heights are compared with three global models of the Earth's gravitational field: EGM2008, EIGEN-6C4 and XGM2019e_2159 (the maximum order of all these models is 2190), as well as with the European geoid EGG2015. It is established that the best accuracy (≈ 7 cm) allows to obtain the European geoid EGG2015. **Scientific novelty and practical significance.** For the first time the accuracy of the Earth's gravitational field models and geoid models on the Ukraine area is investigated at points where the height in the UELN/EVRS2000 height system is known. We established that when constructing a high-precision quasigeoid using the “Remove–Restore” procedure, it is best to use the European geoid EGG2015 as a systematic component.

Key words: European geoid; Ukrainian quasigeoid; height system.

References

- Dvulit P. D. & Holubinka Yu. I. (2009). Porivnialna kharakterystyka vyznachennia vysot kvaziheoida terytorii Ukrainy z vykorystanniam modelei heoida/kvaziheoida ta hravitatsiinoho polia Zemli. *Heodeziia, kartohrafiia ta aerofotoznimannia*, 72, pp. 27–34.
- Kucher O. V., Marchenko O. M., Marchenko D. O., Zaiets I. M. (2012). Pro vykorystannia hlobalnykh modelei EGM08 ta EGG08 dlia vyznachennia vysot kvaziheoida na terytoriiu ukrainy. *Visnyk heodezii ta kartohrafii*, No. 4(79), pp. 13–17.
- Marchenko O. M., Kucher O. V., Renkevych O. V. (2007). Rezultaty pobudovy kvaziheoida dlia rehionu Ukrainy (UKH-2006). *Visnyk heodezii ta kartohrafii*, No. 2, pp. 3–13.
- Marchenko O. M., Kucher O. V., Marchenko D. O. (2013). Rezultaty utochnennia kvaziheoida UKH2012 dlia terytorii Ukrainy. *Visnyk heodezii ta kartohrafii*, No. 3(84), pp. 3–10.
- Denker H. (2015). A new European gravimetric (quasi)geoid EGG2015. Poster presented at XXVI General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), Earth and Environmental Sciences for Future Generations, 22 June – 2 July 2015, Prague, Czech Republic.
- Foerste, Christoph; Bruinsma, Sean.L.; Abrikosov, Oleg; Lemoine, Jean-Michel; Marty, Jean Charles; Flechtner, Frank; Balmino, G.; Barthelmes, Franz; Biancale, Richard (2014): EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/icgem.2015.1>
- Marchenko O. N., Kucher O. V., Marchenko D.O. (2015). Regional quasigeoid solutions for the Ukraine area. *Geodynamics*, No. 2(19), pp. 7–14. doi: <https://doi.org/10.23939/jgd2015.02.007>
- Pavlis N., Holmes S., Kenyon S., Factor J. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008. *Geophysical Research Abstracts*, 10, EGU2008-A-01891, EGU General Assembly, 2008.
- Sacher, M., Ihde, J., Svensson (2006). Status of UELN and Steps on the way to EVRS2007. Presented at the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF) in Riga, June 14–17, 2006 In: *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*, Vol. 40, pp. 57–61, Frankfurt am Main, 2008.
- Sacher, M., Ihde, J., Liebsch, G. (2007). Status of EVRS2007. Presented at the Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF) in London, June 6–9, 2007. In: *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*, Vol. 42, pp. 53–57, Frankfurt am Main, 2009.
- Zingerle Ph., Pail R., Gruber Th., Oikonomidou X. (2019). The experimental gravity field model XGM2019e. GFZ Data Services. URL: <http://doi.org/10.5880/ICGEM.2019.007>

