

РОЛЬ СИСТЕМ ПРИПЛИВІВ ГЛОБАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ГЕОЇДА У ВИЗНАЧЕННІ ВИСОТ МЕТОДОМ GNSS-НІВЕЛЮВАННЯ

Під час застосування методу GNSS-нівелювання на точність визначення висот можуть істотно впливати багато чинників. Загалом можна виділити чинники, пов'язані з процесом GNSS-спостережень та їх опрацюванням, та чинники, пов'язані з вибором моделі висот геоїда/квазігеоїда. В цій роботі увагу зосереджено на аспектах точності GNSS-нівелювання під час вибору глобальних моделей геоїда. Зокрема, для забезпечення вищої точності важливо розуміти, яку роль відіграє вибір системи припливів висот глобальних моделей геоїда. Мета роботи – проаналізувати вплив різних систем припливів глобальних моделей геоїда на точність визначення висот методом GNSS-нівелювання. Розглянуто висоти глобальних моделей геоїда EGM08, EIGEN-6C4, GECO та XGM2019e_2159 високого ступеня/порядку, обчислені у системах припливів "tide free", "mean tide", "zero tide". Аналіз фактичної точності висот геоїда виконано на основі стандартних та середніх квадратичних відхилень різниць висот глобальних моделей геоїда у відповідних припливних системах щодо даних GNSS-нівелювання. Дані GNSS-нівелювання отримано на 14 пунктах високоточного геометричного нівелювання 1–2 класів точності, що охоплюють центральну частину Львівської області. Аналогічно точність проаналізовано на основі різниць гравітаційних аномалій моделей геоїда щодо аномалій високої роздільної здатності моделі WGM2012. За даними різниць висот та гравітаційних аномалій здійснено коригування висот моделей за принципом середнього вагового та розраховано відповідні статистики для них. Аналіз показує, що для моделі EGM08 оптимальною є система припливів "mean tide" з оцінкою точності на рівні $\sigma = 2\text{--}3$ см та $m = 4$ см. Для моделі EIGEN-6C4 найдоцільніше використовувати систему "zero tide", що забезпечить точність до 4–5 см. Точність моделей EGM08 та EIGEN-6C4 підтверджують результати аналізу статистичних характеристик різниць гравітаційних аномалій. Моделі GECO та XGM2019e_2159 дають неоднозначні результати – 3–9 см точності за обома параметрами та у всіх системах припливів. Лише після коригування висот їхня точність досягає 2–5 см. З урахуванням оптимальної системи припливів та після коригування за ваговими коефіцієнтами висоти моделі EGM08 та EIGEN-6C4 можуть забезпечити точність на рівні 1–3 см.

Ключові слова: GNSS-нівелювання; глобальна модель геоїда; система припливів; гравітаційні аномалії; точність; коригування.

Вступ

Сучасний підхід до визначення висот земної поверхні здебільшого ґрунтується на методі GNSS-нівелювання. Хоч цей метод має багато переваг і є хорошою альтернативою класичних наземних методів визначення висот, все ж його застосування має деякі недоліки. Першочергово це пов'язано з тим, що для його реалізації необхідно знати висоти геоїда чи квазігеоїда, які зазвичай отримують з глобальних або регіональних моделей. Основна перевага регіональних моделей – вони фактично повністю адаптовані

для їх прямого використання у визначенні висот методом GNSS-нівелювання [Denker, 2015]. Однак недоліком цих моделей можна вважати те, що їх створюють на певну частину земної поверхні, зазвичай у межах однієї або кількох країн [Reguzzoni, 2021]. Використання глобальних моделей для методу GNSS-нівелювання дає змогу уникнути цього недоліку, оскільки їх створюють у загальноземному масштабі.

Сьогодні на сайті Глобальних моделей гравітаційного поля Землі (International Centre for

Global Earth Models – ICGEM) подано 177 моделей геоїда від 8 до 2190 ступеня/порядку. Для цілей визначення висот методом GNSS-нівелювання необхідно використовувати моделі найвищих ступенів/порядків, як-от: EGM08 [Pavlis et al., 2012], EIGEN-6C4 [Ch et al., 2014], GECO [Gilardoni et al., 2016], XGM2019e_2159 [Zingerle et al., 2020]. У такому разі для деяких регіонів планети глобальні моделі геоїда можуть демонструвати навіть кращу точність, ніж регіональні. Точність моделей оцінюють на пунктах висот високоточного геометричного нівелювання. Як показує практика досліджень, у межах порівняно невеликої території точність може змінюватися від кількох до десятків сантиметрів. Це пов'язано із багатьма факторами, на які необхідно звертати увагу, вибираючи глобальну модель для визначення висот методом GNSS-нівелювання.

Одним із важливих чинників є система припливів, яку вибирають для обчислення висот геоїда (або аномалій висот) із тієї чи іншої моделі. Загалом виділяють три основні припливні системи [Vatrt, 1999; Mäkinen, Ihde, 2009; Mäkinen, 2021]:

1) “tide free” – система, вільна від припливів, у якій вплив потенціалу притягання Місяця та Сонця (прямий ефект) та вплив потенціалу постійної деформації Землі (непрямий ефект) вилучено;

2) “mean tide” – система припливів “середньої Землі”, де вплив прямого та непрямого ефектів зберігається;

3) “zero tide” – система нульових припливів, у якій впливу прямого ефекту уникають, а вплив непрямого зберігається.

У разі визначення висот методом GNSS-нівелювання із використанням глобальних моделей Землі правильний вибір системи припливів може істотно вплинути на їхню точність.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

На території Польщі модель EGM08 протестували на пунктах нормальних висот першого та другого порядків (класів), використовуючи припливну систему “tide free” [Krynski J. et al., 2009]. Узгодженість моделі з даними GNSS-нівелювання на цих пунктах оцінено на рівні стандартного відхилення – 0,020 м (43 пункти

першого класу) та 0,023 м (184 пункти першого та другого класів).

У дослідженні [Ellmann et al., 2009] модель EGM08 у системі “tide free” перевірено щодо даних GNSS-нівелювання на пунктах геометричного нівелювання (система нормальних висот) в країнах Балтики, таких як: Естонія (26 пунктів), Латвія (53 пункти) та Литва (110 пунктів). Стандартні відхилення отриманих різниць становили 4,8 см, 6,3 см та 4,8 см відповідно. Сумісне опрацювання 189 пунктів дало результат 6 см. Автори зробили висновок, що загальна точність аномалій висот, отриманих із моделі EGM08, на рівні точності Балтійського гравіметричного геоїда – BALTgeoid-04.

Науковці із Чехії, Німеччини та Словаччини [Kostelecký et al., 2015] опублікували результати спільного тестування моделей геоїда EIGEN-6C4 та EGM2008 (система припливів “tide free”) для території Європи, США, Канади, Бразилії, Японії, Австралії, Чехії та Словаччини. Оцінку точності виконували для кожного регіону окремо та з різною кількістю залучених пунктів. Для Словаччини використано 64 значення, для Чехії – 1020 значень, а для Європи загалом – 166. Середньоквадратичні відхилення для моделі EGM08 на цих територіях становили 5 см, 3,3 см, 9 см та для моделі EIGEN-6C4 – 4,2 см, 4,0 см, 8,6 см. Такі результати вказують на певне поліпшення EIGEN-6C4 щодо EGM08 для цих територій.

У публікації [Kim et al., 2020] оцінку точності висот моделей геоїда GECO, EIGEN-6C4 та EGM08 в системі “zero tide” щодо даних GNSS-нівелювання виконано на основі 1182 пунктів національної мережі Південної Кореї – UCP (Unified Control Point). Середні квадратичні відхилення для GECO становили 0,236 м, для EIGEN6C4 – 0,221 м та для EGM08 – 0,216 м. Найкраща узгодженість між даними притаманна моделі EGM08, хоча теоретично дві інші моделі мали б продемонструвати вищу точність, оскільки доповнені новими супутниковими та наземними даними.

У грудні 2019 р., на щорічному симпозиумі SIRGAS, оприлюднено дослідження про точність моделей геоїда для різних регіонів планети [Gruber T. et al., 2019]. Окрім моделі EGM2008 та EIGEN-6C4, у системі припливів “tide free”

до уваги взяли модель XGM2019e_2159 в системі “zero tide”. Згідно з даними цього дослідження середньоквадратичні відхилення моделі XGM2019e_2159 від даних GNSS-нівелювання становили: для Німеччини – 2,6 см, для Великої Британії – 4,6 см, для Японії – 7,8 см, для Греції – 13,7 см, тощо.

Аналіз публікацій свідчить, що статистичні властивості характеристик висот глобальних моделей геоїда доволі різні.

Мета

Мета цієї роботи – аналіз впливу різних систем припливів глобальних моделей геоїда на точність визначення висот методом GNSS-нівелювання.

Методика

Територія досліджень охоплює частину Львівської області навколо перманентної станції SULP, як зображено на рис. 1. Як видно з рис. 1, досліджувану територію (Т) також умовно поділено на північну (N) та південну (S) частини відносно станції SULP. Для реалізації поставленої мети у цій роботі використано дані 14 пунктів висот I–II класів точності геометричного нівелювання, на яких виконано GNSS-нівелювання. За цими даними визначено висоти так званого “реального” геоїда та різниці висот щодо значень, отриманих із глобальних моделей:

$$N_{(o)} = H - H_{(к)}^{\gamma} \quad (1)$$

$$\Delta N = N_{(o)} - N_m \quad (2)$$

де $N_{(o)}$ – висоти геометричного (“реального”) геоїда/квазігеоїда, обчислені за даними GNSS-нівелювання; ΔN – різниці висот між значеннями геометричного геоїда/квазігеоїда та модельними висотами; N_m – висоти геоїда, отримані із глобальної моделі, як функція аномалій висот; H – еліпсоїдна висота, одержана у результаті перетворення просторових геоцентричних координат X, Y, Z на еліпсоїдні (B, L, H) із опрацюванням GNSS-вимірів у професійному програмному забезпеченні; $H_{(к)}^{\gamma}$ – нормальна висота, визначена методом високоточного гео-

метричного нівелювання та взята з каталогів висот I–II класів. Середня точність отримання координат X, Y, Z на основі GNSS-вимірів у статичному режимі становить 1–2 см [Савчук та ін., 2022]. Точність визначення нормальних висот методом високоточного геометричного нівелювання прирівнюється до нуля, оскільки отриманий на їхній основі “реальний” геоїд/квазігеоїд задає нульову поверхню відліку висот.



Рис. 1. Територія досліджень

Оскільки висоти моделей геоїда або квазігеоїда обчислюють на основі гравітаційних аномалій (Δg), то для аналізу їх точності використано також значення різниць аномалій:

$$\delta \Delta g = \Delta g_{WGM2012} - \Delta g_m \quad (3)$$

де $\Delta g_{WGM2012}$ – гравітаційні аномалії у вільному повітрі, отримані з моделі WGM2012 (World Gravity Map) із роздільною здатністю $2' \times 2'$ [BGI, 2012]; Δg_m – гравітаційні аномалії глобальних моделей геоїда.

Для аналізу можливості підвищення точності висот глобальних моделей геоїда знайдено скориговані значення різниць:

$$\Delta N(P) = \frac{\Delta N \cdot P}{2P}, \quad (4)$$

де $P = 1/(\delta \Delta g)^2$ – вагові коефіцієнти різниць висот, обчислені на основі гравітаційних аномалій.

Всі висоти геоїда та гравітаційні аномалії одержано через утиліту сайту ICGEM – (User-Defined Points) з урахуванням функції (height

anomaly) та систем припливів (“tide free”), (“zero tide”) та (“mean tide”) для моделей EGM08, EIGEN-6C4, GECO та XGM2019e_2159 [ICGEM, 2022]. За відлікову поверхню прийнято систему GRS80 [Moritz, 1980]. Для перетворення висот моделей геоїда, отриманих у такий спосіб, у масштаб “реального” геоїда всі значення збільшено на 52 см, що відповідає ондуляції геоїда нульового порядку для системи GRS80 [Odu-mosu et al., 2017; Fedorchuk, 2022].

Методика цієї роботи ґрунтується на аналізі середніх квадратичних відхилень (m) та стандартних відхилень (σ) глобальних моделей геоїда для: 1) різниць висот глобальних моделей геоїда (ΔN); 2) різниць гравітаційних аномалій ($\delta\Delta g$); 3) скоригованих різниць висот ($\Delta N(P)$) за ваговими коефіцієнтами. Статистики для різниць висот розраховано за принципом:

$$m_{\Delta N} = \sqrt{\frac{\sum \Delta N_m^2}{2}}, \quad (5)$$

$$\sigma_{\Delta N} = \sqrt{\frac{\sum \Delta N_m^2}{2}}, \quad (6)$$

де ΔN_m – різниці висот, отримані за формулою

$$(2); \overline{\Delta N_m} = N_0 - \left(\frac{(N_0 + N_m)}{2} \right) - \text{різниці висот}$$

без систематичної складової. Аналогічно обчислено статистики для різниць гравітаційних аномалій та скоригованих різниць висот.

Значення $\sigma_{\Delta N}$, $\sigma_{\delta\Delta g}$ та $m_{\Delta N}$, $m_{\delta\Delta g}$ розраховано для дослідження зміни фактичної точності висот геоїда кожної глобальної моделі у різних системах припливів. Значення $\sigma_{\Delta N(P)}$ та $m_{\Delta N(P)}$ відобразатимуть апіорну точність коригування висот моделей геоїда за принципом середнього вагового.

Результати

Стандартні відхилення різниць висот та гравітаційних аномалій глобальних моделей геоїда EGM08, EIGEN-6C4, GECO та XGM2019e_2159 у трьох системах припливів для всієї території досліджень (Т) та для північної (N) та південної (S) її частин наведено в табл. 1, а середні квадратичні відхилення в табл. 2.

Таблиця 1

Стандартні відхилення різниць висот та гравітаційних аномалій

Система припливів		tide free				mean tide				zero tide			
Назва моделі та територія		egm	eigen	geco	xgm	egm	eigen	geco	xgm	egm	eigen	geco	xgm
$\sigma_{\Delta N}$, см	T	2,0	2,3	3,1	2,5	2,1	2,3	3,2	2,5	2,1	2,3	3,2	2,5
	N	2,7	3,0	3,1	3,0	2,6	3,0	3,1	3,0	2,7	3,0	3,1	3,0
	S	1,4	1,4	3,3	1,5	1,5	1,6	3,5	1,6	1,4	1,5	3,4	1,5
$\sigma_{\delta\Delta g}$, mGal	T	0,1	0,1	0,7	1,4	0,1	0,1	0,7	1,4	0,1	0,1	0,7	1,4
	N	0,1	0,2	0,3	1,1	0,1	0,2	0,3	1,1	0,1	0,2	0,3	1,1
	S	0,1	0,1	0,9	1,0	0,1	0,1	0,9	1,0	0,1	0,1	0,9	1,0

Таблиця 2

Середні квадратичні відхилення різниць висот та гравітаційних аномалій

Система припливів		tide free				mean tide				zero tide			
Назва моделі та територія		egm	eigen	geco	xgm	egm	eigen	geco	xgm	egm	eigen	geco	xgm
$m_{\Delta N}$, см	T	9,3	5,1	4,5	4,3	2,9	6,9	8,6	8,1	6,9	3,2	3,5	2,9
	N	11,4	6,9	4,7	6,4	3,7	7,8	10,7	8,4	8,6	4,7	3,8	4,3
	S	10,4	4,7	5,8	3,0	3,0	8,4	9,5	10,4	7,5	2,3	4,3	1,9
$m_{\delta\Delta g}$, mGal	T	0,2	0,8	1,8	2,1	0,2	0,8	1,8	2,1	0,2	0,8	1,8	2,1
	N	0,2	0,8	2,4	1,4	0,2	0,9	2,4	1,4	0,2	0,9	2,4	1,4
	S	0,2	1,0	1,8	3,3	0,2	1,0	1,8	3,3	0,2	1,0	1,8	3,3

З табл. 1 бачимо, що стандартні відхилення різниць висот та гравітаційних аномалій фактично однакові для однойменних моделей геоїда незалежно від систем припливів. Однак різниця у значеннях між північною та південною частинами досліджень може сягати до 1,6 см та 0,6 mGal відповідно.

За результатами табл. 2 бачимо, що середні квадратичні відхилення різниць висот моделей геоїда істотно відрізняються для різних систем припливів. Наприклад, різниця похибок між системами припливів для моделі EGM08 становить 2,4–6,4 см, для EIGEN-6C4 1,9 см, для GECO 1–4,1 см, для XGM2019e_2159 1,4–3,8 см. Крім того, існує певна розбіжність значень між північною частиною та південною для кожної моделі, яка може досягати 0,8–1,1 см, 0,6–2,4 см, 0,5–1,2 см та 1,9–3,4 см для відповідних моделей. Середні квадратичні відхилення гравітаційних аномалій однакові для однойменних моделей у всіх трьох системах припливів. Проте різниця між значеннями північної та південної частини моделі EIGEN-6C4 становить 0,1 mGal, GECO 0,6 mGal, а моделі XGM2019e_2159 – 1,9 mGal.

Результати, наведені в табл. 1, 2, демонструють узагальнену інформацію щодо точності

глобальних моделей геоїда в різних припливних системах. Тому в цій роботі точність проаналізовано за принципом кількісного відношення стандартних відхилень та середніх квадратичних відхилень щодо параметрів точності зі зміною меж у 1 см та 0,1 mGal. На рис. 2, 3 зображено кількісний розподіл стандартних відхилень та середніх квадратичних відхилень різниць висот глобальних моделей геоїда у системах припливів “tide free”, “mean tide” та “zero tide”. Графічно кількісний розподіл статистичних характеристик гравітаційних аномалій зображено на рис. 4, 5.

З рис. 2 бачимо, що за стандартних відхилень значення для моделі EGM08 містяться у межах 5/2/4 см у системі “free/mean/zero tide” відповідно. Для моделей EIGEN-6C4 та XGM2019e_2159 цей результат може сягати 4/4/3 см, а для моделі GECO – 4/5/3 см. Зміни значень середніх квадратичних відхилень (див. рис. 3) загалом розсіяні. Згрупованіші значення можна виділити: 1) для моделі EGM08 у системі припливів “mean tide” в межах до 4 см; 2) для моделей EIGEN-6C4, GECO та XGM2019e_2159 в системі “zero tide” з максимальним значенням до 5 см.

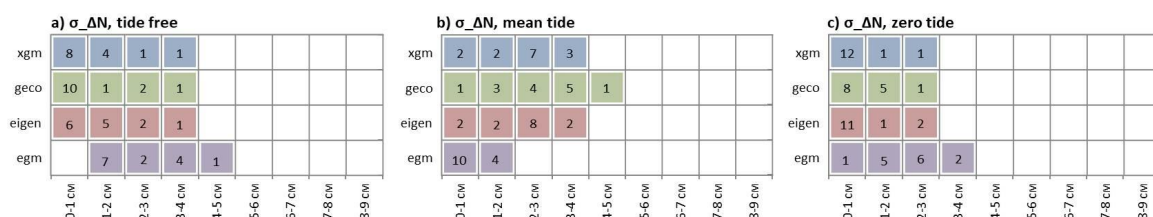


Рис. 2. Кількісний розподіл стандартних відхилень різниць висот глобальних моделей геоїда для систем припливів: а – “tide free”; б – “mean tide”; в – “zero tide”

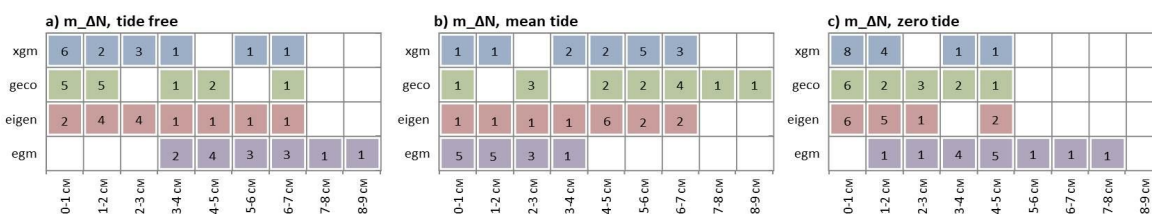


Рис. 3. Кількісний розподіл середніх квадратичних відхилень різниць висот глобальних моделей геоїда для систем припливів: а – “tide free”; б – “mean tide”; в – “zero tide”

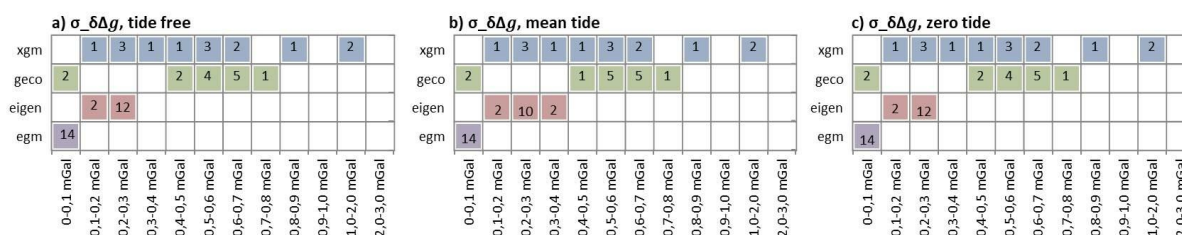


Рис. 4. Кількісний розподіл стандартних відхилень різниць гравітаційних аномалій глобальних моделей геоїда для систем припливів: а – “tide free”; б – “mean tide”; в – “zero tide”

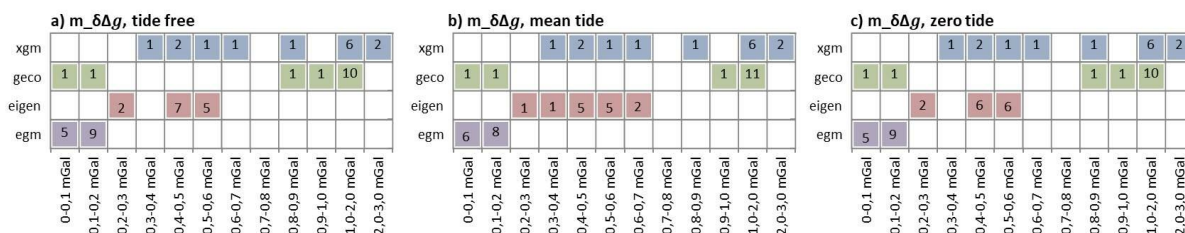


Рис. 5. Кількісний розподіл середніх квадратичних відхилень різниці гравітаційних аномалій глобальних моделей геоїда для систем припливів: а – “tide free”; б – “mean tide”; в – “zero tide”

Для значень стандартних відхилень гравітаційних аномалій (див. рис. 4) надійні межі точності має лише модель EGM08 у межах 0,1 mGal для всіх систем припливів та EIGEN-6C4 в межах 0,3–0,4 mGal. З рис. 5 бачимо, що стосовно середніх квадратичних відхилень різниці гравітаційних аномалій можуть сягати від 0,3 mGal до 0,7 mGal для моделі EIGEN-6C4, від 0,4 mGal до 3 mGal для моделі XGM2019e_2159 та в межах 0–2 mGal для GECO. Лише похибки моделі EGM08 можна вважати такими, що містяться у надійному інтервалі до 0,2 mGal.

Аналізуючи результати рис. 2–5, зазначимо, що кожна глобальна модель геоїда первинно побудована в конкретній системі припливів. Наприклад, моделі EGM08, EIGEN-6C4 та GECO визначено у системі “tide free”, а модель XGM2019e_2159 – як систему “zero tide”. Згідно із резолюцією IAG (International Association of Geodesy) 1983 р. рекомендовано використовувати систему припливів “zero tide” для величин, пов’язаних із геопотенціалом Землі, тобто фактично для моделей гравітаційного поля [IAG, 1984]. А для геодезичних величин, що пов’язані із такими вимірюваннями на земній поверхні, як геометричне та GNSS-нівелювання, систему “mean tide”. Крім того, у разі визначення висот геоїда із глобальних моделей існує ще один важливий параметр – вибір відлікового еліпсоїда, відносно якого будуть визначені ці висоти. На офіційному сайті служби ICGEM є можливість вибрати із переліку запропонованих відлікових еліпсоїдів або ввести параметри свого еліпсоїда. Однак, знову ж таки, Асоціація IAG для опрацювання геодезичних даних рекомендує застосовувати за-

гальноземний еліпсоїд GRS80 (Geodetic Reference System 1980) [Moritz, 2000], який використовує систему припливів “zero tide”.

Зокрема, в Україні висоти пунктів геометричного нівелювання визначено від середнього рівня Балтійського моря. Теоретично для застосування методу GNSS-нівелювання модель геоїда повинна ґрунтуватися на системі середніх припливів, щоб забезпечити найкращу узгодженість та точність. За даними рис. 2–5, для території досліджень цьому критерію відповідає лише модель геоїда EGM08. Інші три моделі демонструють неоднозначні результати. Певною мірою можна вважати, що модель EIGEN-6C4 у системі “zero tide” демонструє дещо кращі результати, ніж GECO та XGM2019e_2159.

Підсумовуючи результати із рис. 2–5, бачимо, що зміни стандартних відхилень для однойменних моделей є одноріднішими та не залежать від вибору системи припливів. Щодо середніх квадратичних відхилень, то вони змінюються доволі неоднозначно. Це свідчить, що вибір конкретної системи припливів під час розрахунку висот геоїда із глобальних моделей істотно впливає на точність визначення висот методом GNSS-нівелювання. Звідси випливає, що для території досліджень точність GNSS-нівелювання щодо середніх квадратичних відхилень можна скоригувати на рівні 4–5 см за умови врахування правильної системи припливів моделі геоїда EGM08 та EIGEN-6C4, а стандартні відхилення будуть на рівні 2–4 см.

У табл. 3 наведено статистичні характеристики різниць висот після коригування за формулою (4), а на рис. 6 – їх кількісний розподіл.

Із табл. 3 видно, що стандартні відхилення не перевищують 2 см для всіх моделей, а

різниця між північними та південними пунктами становить до 1 см. Загалом, найменші стандартні та середні квадратичні відхилення притаманні моделі EGM08 у системі “mean tide” на рівні 1 та 1,4 см відповідно. Для моделей EIGEN-6C4, GECO та XGM2019e_2159 найменші статистики отримано для системи “zero tide” у межах 1–3 см. Такі дані підтверджують результати щодо оптимального вибору системи припливів (див. рис. 2, 3).

З рис. 6 бачимо, що середні квадратичні відхилення скоригованих висот моделей не перевищують 5 см, а стандартні – 3 см.

Коригування висот за ваговими коефіцієнтами уможливорює зменшення похибок на 50 % та усуває ефект розсіяних варіацій.

Таблиця 3

Статистики скоригованих різниць висот

Назва моделі	Система припливів	$\sigma_{\Delta N(P)}$, см			$m_{\Delta N(P)}$, см		
		T	N	S	T	N	S
egm	tide free	1,0	1,3	0,7	4,7	5,7	5,2
	mean tide				1,4	1,9	1,5
	zero tide				3,5	4,3	3,8
eigen	tide free	1,2	1,5	0,7	2,5	3,5	2,4
	mean tide				3,5	3,9	4,2
	zero tide				1,6	2,3	1,2
geco	tide free	1,6	1,6	1,7	2,3	2,4	2,9
	mean tide				4,3	5,3	4,8
	zero tide				1,7	1,9	2,2
xgm	tide free	1,3	1,5	0,7	2,1	3,2	1,5
	mean tide				4,0	4,2	5,2
	zero tide				1,4	2,2	0,9

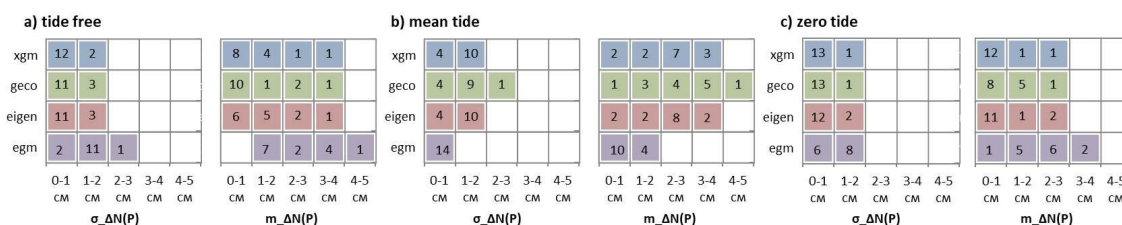


Рис. 6. Кількісний розподіл статистик скоригованих різниць висот глобальних моделей геоїда для систем припливів: а – “tide free”; б – “mean tide”; в – “zero tide”

Наукова новизна та практична значущість

Показано, що правильний вибір системи припливів дасть змогу оптимізувати фактичну точність висот глобальних моделей геоїда для реалізації методу GNSS-нівелювання. Вперше знайдено апіорну точність скоригованих висот глобальних моделей EGM08, EIGEN-6C4, GECO та XGM2019e_2159 на основі вагових коефіцієнтів різниць гравітаційних аномалій із урахуванням систем припливів “tide free”, “mean tide” та “zero tide”. Наведено характеристики для підбирання оптимальної припливної системи, щоб забезпечити вищу точність визначення висот методом GNSS-нівелювання із використанням глобальних моделей геоїда. Встановлено, що навіть для локальних територій точність висот вибраної глобальної моделі може стрімко змінюватися та залежить від точності даних конкретної системи припливів.

Висновки

Отримані у цій роботі результати дають підстави вважати, що для реалізації методу

GNSS-нівелювання правильний вибір системи припливів вибраної глобальної моделі геоїда відіграє важливу роль щодо точності.

Найбільший вплив спостерігається щодо середніх квадратичних відхилень, розмах яких може коливатися до 6,4 см між системами припливів. З погляду стандартних відхилень значення точності висот моделей геоїда більш сталі, вона практично однакова у всіх трьох системах припливів для однойменних моделей. Загалом, різниця значень між північною та південною частинами досліджень – до 1,6 см. Різниця скоригованих висот не перевищує 1 см. Такий ефект швидше пов’язаний із тим, що область досліджень охоплює на півночі рівнинний рельєф, а на півдні – передгірський. Для рівнинніших територій ця різниця буде мінімальною.

З аналізу статистичних характеристик різниць висот та гравітаційних аномалій можна зробити висновок, що фактичні різниці висот моделей геоїда GECO та XGM2019e_2159 мають неоднозначні властивості. Такий ефект усувають, коригуючи висоти моделей за ваговими коефіцієнтами.

Для розглянутої території досліджень висоти моделі EGM08 в системі “mean tide”, а EIGEN-6C4 – у “zero tide” можуть забезпечити точність середніх квадратичних відхилень щодо GNSS-нівелювання на рівні 4–5 см, а стандартних відхилень в межах 2–3 см без урахування додаткових обчислень. Коригуванням висот цих моделей можна отримати точність на рівні 1–2 см та 2–3 см відповідно.

Для реалізації методу GNSS-нівелювання вищих класів точності потрібно здійснити коригування висот глобальних моделей геоїда для локальних територій. Виконання такого завдання можна звести до моделювання різниць висот геоїда, одержаного із GNSS-нівелювання, та відповідної глобальної моделі на основі вагових коефіцієнтів. Результати цього дослідження показують, що під час моделювання таких величин важливим параметром є вибір системи припливів вибраної глобальної моделі геоїда. З іншого боку, результати можна трактувати як необхідність моделювання різниць висот для кожної системи припливів та моделі геоїда індивідуально залежно від форм рельєфу досліджуваної території. Априорна оцінка такого підходу показує, що з урахуванням оптимальної системи припливів глобальної моделі можна очікувати точності на рівні 1–3 см.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Савчук С., Проданець І., Федорчук А., (2022), Застосування методики визначення координат за даними GNSS-спостережень із прив'язкою до мережі активних референціальних станцій. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, вип. I(43), С. 48–54. URL: www.doi.org/10.33841/1819-1339-1-43-48-54
- Bureau Gravimétrique International. WGM2012 GLOBAL MODEL. URL: <http://bgi.obs-mip.fr/data-products/outils/wgm2012-maps-visualizationextraction/>
- Ch, F., Bruinsma, S. L., Abrikosov, O., Lemoine, J. M., Schaller, T., Götze, H. J., Biancale, R. (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*. URL: <https://doi.org/10.5880/icgem.2015.1>
- Denker H. (2015). A new European gravimetric (quasi)geoid EGG2015. Poster presented at XXVII 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. URL: https://www.isgeoid.polimi.it/Geoid/Europe/IUGG_2015_EGG2015.pdf
- Ellmann, A., Kaminskis, J., Parseliunas, E., Jürgenson, H., & Oja, T. (2009). Evaluation results of the Earth Gravitational Model EGM08 over the Baltic countries. *Newton's Bulletin*, 4, 110–121. URL: https://www.isgeoid.polimi.it/Newton/Newton_4/Report_EA2_Baltic.pdf
- Fedorchuk, A. (2022). The Potential Application of the GNSS Leveling Method in Local Areas by Means of Sector Analysis. *Geomatics and Environmental Engineering*, 16(3), 41–55. URL: <https://doi.org/10.7494/geom.2022.16.3.41>
- Gilardoni, M., Reguzzoni, M., Sampietro, D. (2016). GECO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60(2), 228–247. <https://doi.org/10.1007/s11200-015-1114-4>
- Gruber, T., Zingerle, P., Pail, R., Oikonomidou, X. (2019). High resolution gravity field models as global reference surface for heights. In *Simposio SIRGAS Sistema de Referencia Geocentrico para las Americas and 2019 GGOS Days*. URL: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1523939/file.pdf>
- IAG. Resolutions adopted by the International Association of Geodesy: (1984). *The XVIIIth General Assembly, Bulletin géodésique*, vol. 58, pp. 309–323 URL: <https://doi.org/10.1007/BF02519005>
- International Centre for Global Earth Models (ICGEM). URL: <http://icgem.gfz-potsdam.de/>
- Kim, K. B., Yun, H. S., & Choi, H. J. (2020). Accuracy evaluation of geoid heights in the national control points of south Korea using high-degree geopotential model. *Applied sciences*, 10(4), 1466. URL: <https://doi.org/10.3390/app10041466>
- telecky, J., Klokocnik, J., Bucha, B., Bezdek, A., & Förste, C. (2015). Evaluation of gravity field model EIGEN-6C4 by means of various functions of gravity potential, and by GNSS/levelling. *Geoinformatics Fce Ctu*, 14(1), 7–28. URL: <https://doi.org/10.14311/gi.14.1.1>
- Kryniski, J., & Kloch, G. (2009). Evaluation of the performance of the new EGM08 global geopotential model over Poland. *Geoinformation Issues*, 1(1), 7–17. URL: <https://doi.org/10.34867/gi.2009.1>
- Mäkinen, J. (2021). The permanent tide and the International Height Reference Frame IHRF. *Journal of Geodesy*, 95(9), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01541-5>
- Mäkinen, J., & Ihde, J. (2009). The permanent tide in height systems. In *Observing our changing earth* (pp. 81–87). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85426-5_10

- Moritz, H. (1980). Geodetic reference system 1980. *Bulletin géodésique*, 54(3), 395-405. <https://doi.org/10.1007/BF02521480>
- Moritz, H. (2000). Geodetic Reference System 1980. *Journal of Geodesy*. vol. 74. 128–133 <https://doi.org/10.1007/s001900050278>
- Odumosu, J. O., Onuigbo, I. C., Nwadior, I. J., Elegbede, D., & Kemiki, O. A. (2017). Analysis of some factors that affect accuracy in long wavelength geoid determination using GrafLab. URI: <http://repository.futminna.edu.ng:8080/jspui/handle/123456789/10381>
- Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., & Factor, J. K. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of geophysical research: solid earth*, 117(B4). <https://doi.org/10.1029/2011JB008916>
- Reguzzoni, M., Carrion, D., De Gaetani, C. I., Albertella, A., Rossi, L., Sona, G., ... & Sansó, F. (2021). Open access to regional geoid models: the International Service for the Geoid. *Earth System Science Data*, 13(4), 1653–1666. <https://doi.org/10.5194/essd-13-1653-2021>
- Vatrt, V. (1999). Methodology of testing geopotential models specified in different tide systems. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 43(1), 73–77. <https://doi.org/10.1023/A:1023362109108>
- Zingerle, P., Pail, R., Gruber, T., & Oikonomidou, X. (2020). The combined global gravity field model XGM2019e. *Journal of Geodesy*, 94(7), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01398-0>

Alina FEDORCHUK

Department of geodesy and astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine,
e-mail: alina.v.fedorchuk@lpnu.ua, <http://orcid.org/0000-0003-0183-1132>

THE ROLE OF THE TIDAL SYSTEMS OF GLOBAL GEOID MODELS IN THE DETERMINATION OF HEIGHTS USING THE GNSS LEVELING METHOD

When applying the GNSS leveling method, there are many factors that can significantly affect the accuracy of height determination. In general, it is possible to distinguish those related to the process of GNSS observations and their post-processing, and those related to the selection of the geoid/quasi-geoid height model. In this work, attention is focused on aspects of GNSS leveling accuracy when choosing global geoid models. In particular, to better ensure accuracy, it is important to understand the significance of the selection of the tidal system of heights of global geoid models. The purpose of the work is to analyze the influence of different tide systems of global geoid models on the accuracy of height determination by the GNSS leveling method. *Method.* This paper considers the heights of the global geoid models EGM08, EIGEN-6C4, GECO, and XGM2019e_2159 of high degree and order calculated in the tide systems of “tide free”, “mean tide”, “zero tide”. The analysis of the actual accuracy of the geoid heights was carried out on the basis of the standard and root mean square deviations of the height differences of the global geoid models in the corresponding tidal systems in relation to the GNSS leveling data. GNSS leveling data were obtained at 14 high-precision geometric leveling points of accuracy class 1–2, covering the central part of the Lviv region. Similarly, the accuracy of the geoid models was analyzed based on the differences of gravity anomalies concerning the high-resolution anomalies of the WGM2012 model. According to data of differences of height and gravitational anomalies, the height of the models was corrected according to the weighted average principle, and then statistics were calculated. *Results.* The conducted analysis shows that for the EGM08 model, the system of “mean tide” is optimal with an accuracy assessment at the level of $\sigma = 2\text{--}3$ cm and $m = 4$ cm. For the EIGEN-6C4 model, it is best to use the “zero tide” system, which will ensure accuracy up to 4–5 cm. The accuracy of the EGM08 and EIGEN-6C4 models is confirmed by the results of the analysis of the statistical characteristics of the differences of gravity anomalies. The GECO and XGM2019e_2159 models give dissimilar results within 3–9 cm by both parameters and in all tidal systems. Only after correction of the heights, their accuracy is 2–5 cm. The considering of the optimal tidal system and after the correction by weighting coefficients, the heights of the EGM08 and EIGEN-6C4 models can provide an accuracy of 1–3 cm.

Key words: GNSS leveling; global geoid model; tidal system; gravity anomalies; accuracy; correction.

Надійшла 01.07.2022 р.