

УЗГОДЖЕННЯ ВИСОТНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

У статті дається інформація про висотні системи, які застосовуються на території України. Проведений аналіз виконаних досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання проблеми узгодження висотних систем. Переглянуто декілька підходів до створення нової висотної основи України, що забезпечить узгодження її з Європейським стандартом вертикальної референцної системи EVRS.

Ключові слова: висотні системи, референцна система, ETRS, ETRF, квазігеоїд.

Вступ. Єдина система висот у будь-якій країні застосовується в процесі топографічних знімань з метою складання та оновлення карт і планів усього масштабного ряду, розв'язування різноманітних завдань як наукового, так і прикладного характеру.

При застосуванні конкретних методів розв'язання задач висотного забезпечення особливого значення надається точності отримуваних результатів. Доки роботи, пов'язані з використанням певної системи висот, велися ізольовано одна від одної або не потребували високої точності, різноманіття висотних систем (нівелірних мереж) не створювало яких-небудь незручностей. Але вони з'явилися одразу, як тільки виникла потреба спільного використання результатів робіт на різні регіони. Не завжди вдавалося досягнути задовільного узгодження між різними початками відліку висот через різницю в середніх рівнях морів, яка в багатьох випадках значно переважала похибки геометричного нівелювання.

Постановка проблеми. При зведенні нівелірних мереж, побудованих у різний час, виникають певні труднощі передусім методичного характеру. Внаслідок геодинамічних процесів у різних регіонах Європи висоти пунктів змінюються в межах 2-5 мм, а, скажімо, на Кавказі аж до 10 мм на рік. Крім того, велику частку

гравіметричних вимірів, що використовувалися при нівелюванні, було проведено в 50-60-ті роки ХХ ст. (до того ж вони базувалися на застарілих методиках). Звідси виникає питання про введення поправок за вертикальні рухи земної кори та різносистемність висот.

Ще у 1946 р. єдину систему висот було запроваджено на території СРСР. За вихідний (нульовий) рівень відліку висот тоді прийняли рівень Балтійського моря (Кронштадтський футшток). Пізніше, після чергового врівноваження нівелірної мережі СРСР, ввели Балтійську систему висот 1977 р. Ця система встановлює порядок відліку нормальних висот від нуля Кронштадтського футштока. Вона й досі використовується в Україні.

Виклад матеріалу дослідження. Першою об'єднаною нівелірною мережею для Західної та Центральної Європи стала мережа UELN-73, для країн Центральної та Східної Європи – об'єднана високоточна нівелірна мережа UPLN-82.

Нульовим рівнем для UELN є футшок Амстердам, а для UPLN – футшок Кронштадт. В результаті об'єднання цих мереж було створено робочу мережу UELN-95 – Єдину європейську нівелірну мережу, поширену пізніше також на Естонію, Литву, Латвію, Румунію (UELN-95/98).

Десятиріччями ця мережа мала в основному наукове значення і використовувалась не так часто геодезистами та океанографами-практиками. Але із зростанням потреби в єдиній Європейській референційній системі ситуація стала швидко змінювати. Остання розробка Європейської комісії з інфраструктури для просторової інформації в Європі (INSPIRE) вже посприяла створенню Європейського ГІС-стандарту. Тож очевидно, що стандартизація геодезичної референційної системи координат, а особливо вертикальної референційної системи, є важливою роботою [2].

Прийнята у 2000 р. в Європі вертикальна референційна система EVRS отримала статус стандарту, а тому вона сприятиме використанню національних систем висот у міжнародних масштабах. Багато країн при оновленні національних систем висот шукають можливості узгодження їх із цим стандартом. І відбувається це незалежно від проекту INSPIRE, адже тут необхідно застосувати тільки формули переходу від однієї системи до іншої, а не проводити узгодження. Що стосується стану справ в Україні з цього питання, то можна зауважити наступне. Балтійська система висот 1977 р.

негативно впливає на організацію нівелірних робіт, оскільки базується на незавершеній стратегії: вона не має безпосереднього зв'язку з Європейською вертикальною системою та не адаптована до сучасних моделей гравіметричного квазігеоїда.

Застосування на території Європи GPS-технологій в роботах з нівелювання стрімко розширюється. Основним при цьому є наявність (квазі)геоїда, який був би побудований з використанням GPS-технологій та узгоджений з референсною висотною системою, тобто умова узгодженості висотної системи із загально визнаним стандартом є обов'язковою. Для побудови такого (квазі)геоїда насамперед необхідно використати Європейський гравіметричний квазігеоїд EGG97 та референцну систему координат ETRS (реалізацію ETRF 89). На жаль, досі Європа не має точного квазігеоїда на рівні декількох сантиметрів, який би повністю задовольняв вимоги практичних застосувань [1].

Пункти мережі UELN необхідні насамперед для визначення такого (квазі)геоїда. Його модель одержують за допомогою методів GPS-нівелювання через комбінацію існуючих референцних мереж ETRS/ETRF89 з UELN. Для цього і було започатковано проект об'єднаної Європейської вертикальної мережі – EUVN з метою об'єднання різних європейських висотних даних (національних нівелірних мереж) у єдину висотну систему з точністю в декілька сантиметрів.

EUVN об'єднує близько 196 пунктів: 66 станцій Європейської перманентної мережі (EPN), 13 національних перманентних GPS-станцій, 54 UELN-UPLN-пунктів та 63 футштоки. Найпівнічніша EUVN-станція Ny Alesund розміщена на Шпіцбергені, найпівденніша – футшток Ларнака – на Кіпрі. Найзахідніша станція Рейк'явік знаходиться у Північній Атлантиці, найсхідніша – Yozgat – у Туреччині. У мережу EUVN входять також чотири станції, розміщені на території України: UK01 – Голосіїв (Київ), UK02 – Ужгород (Деренівка), UK03 – Миколаїв, UK04 – Сімеїз (Крим).

У ході реалізації проекту EUVN практикувалися три групи спостережень:

- GPS-виміри для визначення геодезичних висот всіх EUVN-точок;
- геометричне нівелювання між пунктами EUVN та вузловими пунктами UELN-UPLN для визначення фізичних висот всіх пунктів EUVN;
- спостереження рівня моря на футштоках.

На всіх пунктах EUVN було визначено тривимірні координати в системі ETRF89 $(X_p, Y_p, Z_p)_{ETRS}$ та обчислено геопотенціальну величину $C_p = W_{0EUVN} - W_p$, яке є різницею потенціалів гравітаційного поля Землі референцного футштока Амстердам мережі EUVN (W_{0EULN}) та дискретних точок цієї мережі (W_p). Зараз EUVN являє собою геометрично-фізичну референцну висотну систему. Додатково до геопотенціальних величин C_p були залучені нормальні висоти $H^p = C_p / \gamma_m$, де γ_m – середнє нормальне значення прискорення сили ваги між еліпсоїдом і телуроїдом. Як відомо, у теорії М. С. Молоденського розглядаються тільки поверхня еліпсоїда, фізична поверхня Землі й поверхня, що утворена відкладанням від еліпсоїда нормальних висот. Цю останню поверхню називають ще гіпсометричною поверхнею, або телуроїдом. Таким чином, вважається відомою поверхня телуроїда, а вже щодо неї визначаються висоти фізичної поверхні Землі.

Аналіз повторних нівелювань показав, що на першому етапі побудови Європейського (квазі)геоїда не потрібно вносити додаткові поправки у висоти, оскільки протяжність тектонічно активних зон відносно мала. Але у майбутньому геодинамічний ефект слід буде враховувати.

Порівняння нормальних висот, віднесених до Кронштадтського футштока, та нормальних ортометричних висот Амстердамської системи показує різницю в 15 см. Можна стверджувати, що ця величина є наближеною різницею між вертикальними системами, прив'язаними до середнього рівня Північного та Балтійського морів.

Підсумовуючи вищенаведені міркування про побудову Європейського (квазі)геоїда для забезпечення загальноєвропейської вертикальної висотної системи, можна зробити такі висновки:

- 1) різниці між двома реалізаціями UELN та UPLN є незначними для редукції гравітаційних величин;
- 2) для редукції висот гравіметричних пунктів згадана вище різниця між рівнями Кронштадтського та Амстердамського футштоків дорівнює 15 см;
- 3) щоб найкраще врівноважити Європейську нівелірну мережу, необхідно визначити висоти квазігеоїда високоточним нівелюванням та GPS-вимірами у поєднанні з UELN та UPLN шляхом сполучення двох континентальних мереж нівелюванням для надійного

визначення різниці рівнів.

Якщо припустити, що висоти відраховуються від рівневої поверхні, яка визначається з рівняння $W=const$ і збігається з рівнем моря, то задача полягатиме у визначенні висот точок фізичної поверхні Землі, а також у визначенні висот геоїда та квазігеоїда від вибраного еліпсоїда. Загальновизначеними сьогодні вважаються нормальні висоти, оскільки вони визначаються більш строго.

Нормальна висота H^N встановлюється з різниці потенціалів точок поверхні Землі: $W_0 - W$ (з геопотенціальної величини C_p), і вона не залежить від положення усередині неї відлікового еліпсоїда. Тож виходить, що геодезична висота H й аномалія висоти ζ залежать від вибору еліпсоїда, і одна точка на поверхні Землі може мати кілька значень геодезичної висоти й аномалії висоти. Нормальна висота визначається з вимірів на поверхні Землі й має для даної точки єдине значення при незмінному положенні точки початку відліку геопотенціальної величини C_p .

Щоб перейти від нормальної висоти H^N до висоти геодезичної H , потрібно додати до неї відрізок ζ який називають аномалією висоти:

$$H = H^N + \zeta \quad (1)$$

Це просте співвідношення відіграє нині в геодезії важливу роль.

У досупутниковий період рівність (1) використовували для обчислення геодезичної висоти. Величинами, що можуть бути вимірними, є сила ваги g і геопотенціальна величина C_p . Після вибору нормального еліпсоїда й обчислення аномалій сили ваги $\Delta g = g - \gamma$ можна знайти гравіметричну аномалію висоти ζ^{gp} . Нормальна висота визначається однозначно і незалежно від еліпсоїда за геопотенціальною величиною C_p . Алгоритм цього методу має такий вигляд:

$$g; W_0 - W = C_p; W_0 = U_0; H^N; \zeta^{gp} \rightarrow H = H^N + \zeta^{gp}.$$

За дуже короткий проміжок часу розвитку сучасних GPS-технологій рівняння (1) стали використовувати у таких формах:

$$\zeta = H - H^N; \quad (2)$$

$$H^N = H - \zeta, \quad (3)$$

що дозволяє «вимірювати» висоту квазігеоїда ζ якщо H та H' для геодезичних пунктів відомі з даних GPS-нівелювання та гравіметрії (2), або просто визначати нормальні висоти, якщо відомі аномалії висот ζ (3).

Рівняння (2) і (3) дають дуже важливу інформацію для встановлення, підтримання та розвитку висотної референцної системи. Але оскільки традиційно гравіметричні рішення для ζ мають високу відносну роздільну здатність і потребують додаткових перетворень до абсолютного рівня через так звані параметри зміщення та нахилу, які еквівалентні відомим параметрам зсуву, то формулу (3) можна розглядати швидше як ідеальну.

У випадку прямого використання формули (3) гравіметричний квазігеоїд EGG97 може давати вищу точність в регіональному/локальному масштабі після додаткового перетворення його у мережу пунктів GPS-нівелювання, використовуючи при цьому ті самі пункти EUVN для визначення параметрів перетворення. Різниця «виміряних» висот квазігеоїда в пунктах GPS-нівелювання вертикальної референцної мережі EUVN, в якій нормальні висоти H' та GPS-визначені аномалії висот ζ урівноважені, оцінюються з точністю 5 см на континентальному рівні, 5-10 см на більшості території Європи (а в окремих регіонах навіть 1,5 м і більше), незважаючи на формальну оцінку точності EGG97, яка не повинна перевищувати 10 см. [3]

У цілому для регіонів, що мають добре покриття та якість вхідних даних, оцінка точності висот квазігеоїда змінюється від 1-5 см на 10 км до кількох сантиметрів на 100 км та 5-20 см на 1000 км. Похибки моделі EGG97 для середніх та довгих хвиль (понад 100 км) були знайдені порівнянням з контрольними пунктами GPS-нівелювання і можуть досягати значень від 0,1 до 1,0 проміле. Незважаючи на це, модель EGG97 може бути незамінною при перетворенні GPS-висот (геодезичних) до висот, що пов'язані з гравітаційним полем Землі, а також для трансформації квазігеоїда у систему GPS-нівелювання з кількома контрольними пунктами.

Згідно з Постановою Кабінету Міністрів, нормальні висоти пунктів державної нівелірної мережі України визначаються у Балтійській системі висот 1977 р.

Але є низка чинників, які знижують статус мережі. Це передусім трудність її адаптації до Європейської вертикальної референцної мережі EUVN, вертикальної системи EVRS та методів GPS-

нівелювання. Невирішеними при цьому є також питання кількісної розбіжності між висотними мережами.

Зауважимо, що модель EGG97 високої роздільної здатності (1,0'x1,5') забезпечує східну частину Європи лише до меридіана з довготою 33°. Наприклад, розбіжність на станції UK04 (Сімеїз) мережі EUVN між EGG97 та даними GPS-нівелювання становить 1,24 м, що пояснюється саме невизначеностями в EGG97 у регіоні Криму.

Загальновідомий факт: отримана у 1992 р. після об'єднання Німеччини різниця між нормальною (N) висотою, віднесеною до Балтійської системи (це територія колишньої НДР), та нормальною ортометричною (NO) висотою, що відноситься до Амстердамської системи, у пункті Норpegarten (поблизу Берліна) становить $H^{NO}-H^N=15$ см. Втім, ця величина не є різницею між еквіпотенціальною поверхнею, що проходить через Амстердамський (прийнятий за вихідний у системі EVRS) та Кронштадтський футштоки, оскільки референцна поверхня нормальних висот – це усім відомий квазігеоїд, а референцна поверхня нормальних ортометричних висот досі ще точно фізично не визначена. Але вже сьогодні можна стверджувати, що 15 см – це приблизна різниця між вертикальними системами відносно середнього рівня Північного та Балтійського морів.

Для числового визначення різниці між Європейською вертикальною системою EVRS і Балтійською (1977 р.) системою висот для регіону України звернемося до формули Молоденського у вигляді:

$$H_{Am}^v = H - \zeta_{EGG97}, \quad (4)$$

де ζ_{EGG97} – висоти квазігеоїда EGG97; H – геодезичні висоти пунктів GPS-нівелювання; H_{Am}^v – обчислені за формулою (4) нормальні висоти, що розглядаються у системі EVRS, до якої віднесені висоти квазігеоїда EGG97. Оскільки значення нормальних висот H_{Bal}^v у системі «Балтійська-77» відомі у тих же точках GPS-нівелювання саме за даними геометричного нівелювання, то різниця $\Delta H^v = H_{Am}^v - H_{Bal}^v$ характеризує можливу систематичну розбіжність між двома висотними системами в регіоні України.

Середнє значення різниці ΔH^v для всіх пунктів становить 12,7 см. І хоча ця різниця відхиляється лише на 2,3 см від зафіксованої різниці в 15 см, звертаємо увагу на досить суттєві

розбіжності точкових ΔH^y із заходу на схід, що може бути пов'язане як з похибками у визначенні висот квазігеоїда, так і з похибками у побудові мережі нівелювання.

Теоретично перехід від вертикальної системи ERVS до Балтійської-77 можна оцінити через так звану ондуляцію квазігеоїда нульового рівня:

$$-\Delta H^y_0 = \zeta_0 = -(W_0^{\text{EVRS}} - W_0^{\text{Bal}}) / \gamma, \quad (5),$$

в яку входять значення потенціалу сили ваги W_0 , що прийняті у відповідних футштоках для вказаних висотних систем. W_0^{EVRS} дорівнює потенціалу нормального еліпсоїда GRS80. Значення W_0^{Bal} , природно, не тільки відрізняється від відповідного значення в GRS80, а й, на жаль, невідоме, через що і виникає невизначеність системи «Балтійська-77».

Щоб вийти з такої колізії, необхідно скористатися можливістю перетворення модельного геоїда в систему пунктів GPS-нівелювання, оскільки між висотою квазігеоїда $\zeta_{\text{вим}}$, визначеною на основі рівняння (3.3.2), та проінтерпольованою висотою EGG97 Європейського гравіметричного геоїда EGG97 в точці з геодезичними координатами B, L існує певна залежність. Різниці між вказаними значеннями аномалій висот позначимо через $\Delta\zeta$. Тоді на основі диференціальних складових нормального потенціалу U , що пов'язують прирости потенціалу притягання ΔU_1 та потенціалу відцентрової сили ΔU_2 з параметрами зсуву (трансформації) dx, dy, dz центру референц-еліпсоїда відносно центру загально-земного еліпсоїда, можемо скласти відповідну функціональну залежність:

$$\Delta U[\Delta\zeta] + \varepsilon = \Delta U_1[GM, B, L, dx, dy, dz] + \Delta U_2[\omega, dx, dy], \quad (6),$$

де GM – добуток гравітаційної сталої на масу Землі; ω – кутова швидкість обертання Землі; B, L – геодезичні координати точки, для якої визначено значення $\Delta\zeta$; ε – вплив похибок вимірів що мінімізуються.

Із розв'язку рівнянь (їх можна розглядати як параметричні рівняння), складених на основі залежностей (6) для всіх вибраних пунктів нівелірної мережі, способом найменших квадратів визначаємо параметри трансформації dx, dy, dz , а потім, відповідно, і зміну потенціалу ΔU між нормальним потенціалом загальноземного еліпсоїда та потенціалом еліпсоїда, змішеного відносно нього.

Якщо тепер прийняти, що зміщеним відносно загальноземного є еліпсоїд Красовського, то визначення зміни потенціалу ΔU (при відомому значенні U_0^{GRS80} потенціалу нормального еліпсоїда GRS80) дозволить обчислити значення потенціалу еліпсоїда Красовського $U_0^{К-Б}$. Індекс «Б» означає Балтійську систему початку відліку висот, оскільки вихідні дані про нормальні висоти задані саме в цій системі відліку. Ця величина відповідатиме нульовому рівню, для якого потенціал гравітаційного поля Землі дорівнює нормальному потенціалу еліпсоїда Красовського $U_0^{К-Б}$: $W_0 = U_0^{К-Б}$.

Використання такого підходу дозволить обійти невизначеність системи «Балтійська-77» та узгодити висотні системи ізольованих нівелірних мереж.

Висновки. Перехід від Європейської до Балтійської системи висот не можна здійснити в достатній мірі точно без використання методики обов'язкового перетворення EGG97 у мережу пунктів GPS-нівелювання.

Основна ідея встановлення відліку висот полягає в тому, що висоти гравіметричного квазігеоїда теоретично строго визначаються відносно загальноземного еліпсоїда GRS80 (центр якого суміщений з центром мас Землі) і тому поверхня загальноземного еліпсоїда і потенціал U_0^{GRS80} цього еліпсоїда визначають свою систему відліку висот. Потенціал $U_0^{К-Б}$ визначатиме іншу – регіональну систему відліку висот. При цьому основна перевага полягає не тільки і не скільки у принципі збереження існуючої висотної системи, скільки у можливості переходу в будь-яку вертикальну систему, яка зв'язана з гравітаційним полем Землі. Зазначена система відповідатиме такому нульовому рівню, для якого потенціал W_0 дорівнює нормальному потенціалу зміщеного еліпсоїда Красовського: $W_0 = U_0^{К-Б}$.

У подальшому це дозволить перейти до створення нової висотної основи України, що забезпечить узгодження її з Європейським стандартом вертикальної референцної системи EVRS. [4]

**Рецензент – кандидат технічних наук, доцент
В. Д. Барановський**

Література:

1. Марченко О. М. Результати побудови квазігеоїда для регіону України (УКГ-2006) [Текст] / Марченко О. М., Кучер О. В., Ренкевич О. В. // Вісн. геодез. та картогр. – 2007. – № 2. – С. 3-13.

2. Про впровадження на території України Світової геодезичної системи координат WGS-84, №2359 від 22 грудня 1999 р. [Текст] (Постанови Кабінету Міністрів України).

3. Савчук С. Супутникова система спостережень – елемент ефективного управління земельними ресурсами [Текст] / Савчук С., Калинич І., Третяк К. // Землевпорядний вісник. – 2007. – № 1. – С. 37-43.

4. EUREF permanent network [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.epncb.oma.be>.

Мельник С. О.

СОГЛАСОВАНИЯ ВЫСОТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ

В статье дается информация о высотных системах, которые применяются на территории Украины. Проведен анализ выполненных исследований и публикаций, в которых начато решение проблемы согласования высотных систем. Рассмотрено несколько подходов к созданию новой высотной основы Украины, что обеспечит согласование её с Европейским стандартом вертикальной референсной системы EVRS.

Ключевые слова: высотные системы, референсная система, ETRS, ETRF, квазигеоид.

S. Melnik

MATCHING OF ALTITUDE SYSTEMS IN UKRAINE

The article provides the information on altitude systems that are used on the territory of Ukraine. There is analyzed the research and publications that have begun to solve the problem of matching altitude systems. There are revealed some approaches to creating new altitude bases of Ukraine which will provide its coordination with the European standard of vertical reference system EVRS.

Keywords: altitude systems, reference system, ETRS, ETRF, quazigeoid.

Надійшла до редакції 17 квітня 2014 р.