

## **РЕЦЕНЗІЯ**

на дисертаційну роботу

**Федорчук Аліни Володимирівни**

**«Методика підвищення точності GNSS-нівелювання на основі  
локального коригування висот глобальних моделей геоїда»**

поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії

в галузі знань 19 – Архітектура та будівництво

та спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій».

### **1. Актуальність, мета і задачі дослідження. Зв'язок з науковими програмами, планами та темами**

Традиційно, ортометричні або нормальні висоти отримували методом високоточного геометричного нівелювання шляхом визначення перевищень між пунктом з відомою та невідомою висотою з урахуванням гравіметричних поправок у висоти нівелірних пунктів. Числові значення отриманих у такий спосіб висот задають національну систему відліку висот, в її традиційному розумінні. Однак, процес класичного високоточного нівелювання є дуже трудомістким, зтяжним та високовартісним. З появою та розвитком GNSS-систем з'явився новий метод визначення висот точок фізичної поверхні Землі який називають GNSS-нівелюванням. Новітній підхід базується на визначенні еліпсоїдних висот за даними GNSS-вимірів та використанні висот наявної моделі геоїда або квазігеоїда. Для території України прийнята нормальна система відліку висот, і для успішної інтеграції результатів GNSS-нівелювання в традиційну нівелірну мережу необхідно залучити саме високоточну модель квазігеоїда. Наявні моделі квазігеоїда, розроблені на територію України, або не є загальнодоступними, або не відповідають високому рівню точності.

Метою дисертаційної роботи є розроблення методики локального коригування висот геоїда/квазігеоїда глобальних моделей для підвищення точності методу GNSS-нівелювання. Виконана дисертаційна робота

Федорчук А. В. відповідає тематиці наукової діяльності кафедри вищої геодезії та астрономії Національного університету «Львівська політехніка» – «Моніторинг фізичної поверхні Землі та її атмосфери на основі аналізу результатів сучасних наземних і супутникових вимірювань».

## **2. Аналіз основного змісту, наукової новизни, вірогідності досліджень та обґрунтованості та рекомендацій.**

Дисертаційна робота Федорчук А. В. складається з анотації, вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 218 сторінок, у тому числі 150 сторінок основної частини, включаючи 51 рисунок, 22 таблиці та 226 позицій списку літератури.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено мету, об'єкт, предмет і основні задачі дослідження, розкрито наукову новизну, теоретичне та практичне значення отриманих результатів, наведено зв'язок роботи із науковими програмами. Також приведено список опублікованих робіт і особистий вклад автора в опублікованих статтях.

У першому розділі розглянуто сучасні моделі відлікових поверхонь, що використовують в цілях визначення висот методом GNSS-нівелювання. Розглянуто методику побудови основних систем висот (ортометричних та нормальних) з огляду класичних та сучасних підходів, якими є метод високоточного геометричного та GNSS-нівелювання. Проаналізовано основні параметри моделювання сучасних відлікових поверхонь, які відображають переваги та недоліки використання цих моделей для реалізації методу GNSS-нівелювання. З проведеного автором аналізу наукових досліджень пов'язаних з тематикою GNSS-нівелювання зроблено висновок, що сьогодні немає універсального підходу щодо моделювання відлікових поверхонь з високою точністю. Тому знайти розв'язання цієї проблеми можна шляхом уточнення (тобто коригування) висот геоїда/квазігеоїда глобальних моделей високого ступеня та порядку.

У другому розділі розглянуто основні джерела похибок при виконанні GNSS-спостережень та наведено рекомендації щодо мінімізації їхнього впливу на кінцеві дані, тобто на точність отриманих координат та висот. Розглянуто процедуру опрацювання GNSS-спостережень у стандартному програмному забезпеченні з детальним описом етапів опрацювання даних для можливості збереження належного рівня точності отриманих координат та висот. Виконано аналіз похибки визначення еліпсоїдних висот із даних GNSS-спостережень та досліджено її вплив на загальну точність результатів методу GNSS-нівелювання. Отримані автором результати показують, що вплив похибки визначення еліпсоїдних висот може складати 2–19% в залежності від методу спостережень та типу нівелірного знаку. Також, такий аналіз дав змогу отримати підтвердження щодо цілковитого забезпечення точності визначення еліпсоїдної висоти на рівні 1-2 см при належному виконанні GNSS-спостережень відносним методом у статичному режимі.

Третій розділ присвячений оцінці точності висот геоїда/квазігеоїда глобальних моделей отриманої на основі даних високоточного геометричного та GNSS-нівелювання. У цьому розділі також детально розглянуто всі типи сучасних моделей геоїда та квазігеоїда та виокремлено основні їхні характеристики, що безпосередньо впливають на загальну точність GNSS-нівелювання. Зокрема, автор показав, що моделі висот геоїда та квазігеоїда регіонального масштабу, а саме EGG2015 та УКГ2012, мають ряд суттєвих недоліків, що обмежує їхнє використання для багатьох науково-практичних застосувань. На основі теоретичних та експериментальних даних проаналізовано особливості висот геоїда/квазігеоїда глобальних моделей та виокремлено основні параметри їхньої точності, а саме, встановлено, що першочерговими чинниками впливу на точність є: 1) ондуляція геоїда нульового порядку та 2) вибір системи припливів модельних висот. Автор також наголошує, що навіть після врахування цих чинників, висоти геоїда/квазігеоїда глобальних моделей будуть містити систематичні похибки щодо прийнятої національної системи висот. В цьому розділі, автор також

проаналізував висоти глобальних моделей з можливістю їхнього коригування шляхом виявлення та вилучення систематичної складової на основі так званого секторного аналізу до рівня 2 см точності, з огляду стандартного та середньоквадратичного відхилення. Це дослідження дало змогу автору встановити чинники, що обмежують можливості щодо більш високоточного коригування модельних висот.

У четвертому розділі розроблено методику локального коригування висот геоїда/квазігеоїда глобальних моделей для можливості підвищення точності методу GNSS-нівелювання. Методика базується на принципі моделювання похибок висот геоїда/квазігеоїда глобальних моделей високого ступеня та порядку, таких як EGM2008, EIGEN-6C4, GECO та XGM2019e\_2159, на основі використання вагових коефіцієнтів різниць гравітаційних аномалій. Автор реалізував розроблену методику на основі експериментальних даних отриманих для різних географічних територій локального масштабу. У роботі автор також детально проаналізував основні параметри моделювання похибок висот глобальних моделей (масштаб, розмірність та рельєф території, кількість та конфігурацію контрольних пунктів), а також запропонував принцип їхнього перетворення на поправки. Запропонована методика уможливорює коригування модельних висот геоїда/квазігеоїда на рівні 1 см, і менше, з урахуванням оптимальних параметрів моделювання похибок висот обраної глобальної моделі високого ступеня та порядку.

У висновках дисертаційної роботи наведено основні результати, що розв'язують важливу науково-практичну задачу щодо проблеми підвищення точності GNSS-нівелювання, а саме:

1. Обґрунтовано можливість використання висот геоїда/квазігеоїда глобальних моделей високого ступеня та порядку для визначення висот точок фізичної поверхні Землі методом GNSS-нівелювання, як альтернативу регіональним моделям.

2. Показано, що висоти глобальних моделей містять систематичні

похибки, які проявляються у вигляді “зсуву” щодо прийнятої системи висот, а їхня первинна точність не задовольняє більшість геодезичних робіт вищих класів.

3. Досліджено точність похибок висот глобальних моделей отриманих на пунктах високоточного геометричного нівелювання шляхом секторного, просторового та кількісного аналізу з огляду стандартних та середньоквадратичних відхилень.

4. Встановлено залежність між похибками модельних висот геоїда/квазігеоїда та похибками гравітаційних аномалій однойменних глобальних моделей.

5. Розроблено методику коригування висот геоїда/квазігеоїда глобальних моделей, де вперше використано вагові коефіцієнти різниць гравітаційних аномалій, що дозволяє істотно знизити вплив похибок модельних висот і, таким чином, підвищити точність методу GNSS-нівелювання.

6. На основі експериментальних даних перевірено методику локального коригування висот геоїда/квазігеоїда глобальних моделей для різних географічних територій з різною розмірністю площі та формами рельєфу.

### **3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій сформульованих у дисертаційній роботі**

Наукові положення, висновки та рекомендації, які сформульовані в дисертаційній роботі відповідають вимогам такого виду досліджень. Високий рівень обґрунтованості наукових положень, висновків та їхня вірогідність забезпечені використанням широкої бази літературних джерел за темою дисертаційної роботи, список яких становить 226 найменувань. Вірогідність наукових і практичних результатів підтверджується використанням різних методів математичного опрацювання практичних та експериментальних даних щодо похибок висот геоїда/квазігеоїда глобальних моделей, деяких нестандартних методів секторного, просторового, кількісного аналізу та методиці локального моделювання похибок висот, що базується на

комплексному поєднанні методу інтерполяції, фільтрації та врівноваженні даних за принципом вагових функцій.

**Практичне значення роботи** полягає в тому, що отримані поправки на основі розробленої методики локального коригування висот геоїда/квазігеоїда глобальних моделей уможливають застосування методу GNSS-нівелювання для визначення нормальних висот у прийнятій традиційній системі з точністю на рівні III–IV класу геометричного нівелювання. Отримані автором результати уможливають підвищення точності виконання GNSS-нівелювання та дають змогу розширити спектр геодезичних застосувань пов'язаних із визначенням висот точок фізичної поверхні Землі в цілях побудови та оновлення нівелірних мереж III–IV класів точності, при створенні висотної основи для різноманітних топографічних карт, як повноцінна заміна технічному нівелюванню, для виконання моніторингу за небезпечними техногенними та природними явищами, для можливості реалізації 3-D кадастрових знімачів, для забезпечення висотної основи у будівельній, транспортній, нафтогазовій, гірничодобувній, водогосподарській сферах та в цілях здійснення геоприв'язки GNSS-станцій до традиційної чи новітньої системи висот.

#### **4. Дискусійні положення і зауваження щодо змісту дисертаційної роботи**

На основі вивчення та аналізу теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи Федорчук А. В. слід звернути увагу на деякі окремі зауваження:

- 1) у роботі зазначено, що для використання запропонованої методики на територію України достатньо окрім даних GNSS-нівелювання користуватися глобальними моделями гравітаційного поля Землі та моделлю WGM2012, які є у відкритому доступі. При чому, розрізнявальна здатність сітки співпадає із WGM2012 і складає  $2' \times 2'$ . Зазначимо, що для території України розрізнявальна здатність моделі WGM2012 складає  $\approx 10' \times 15'$ , а сітка  $2' \times 2'$  будується інтерполяційними

методами. Тому використання запропонованої методики на територію України в локальному масштабі можна рекомендувати після підвищення гравіметричної вивченості території нашої держави;

- 2) для апробації даної методики на нашу думку її слід було б порівняти з іншими методиками на тих самих масивах вхідних даних. Оскільки запропонована методика інтерполяційна, її доречно порівнювати із готовими інтерполяційними програмними продуктами (наприклад, ПЗ LGO, Trimble Business Center тощо);
- 3) в п. 1.2.1 описуються процедури перетворення і трансформування координат в довільній формі, тому ми рекомендуємо автору звернутися до міжнародного стандарту ISO/FDIS 19111;
- 4) по тексту дисертації зустрічаються неточності та нелогічно побудовані речення, наприклад:
  - формула 1.7 – позначення функції тангенс не загальноприйняте (в довільній формі);
  - не роздільна, а розрізнявальна здатність.

Зазначені зауваження не знижують загальний рівень дисертаційної роботи та актуальність, цінність та важливість отриманих результатів.

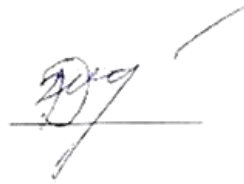
## **5. Висновок**

Дисертаційна робота Федорчук Аліни Володимирівни на тему «Методика підвищення точності GNSS-нівелювання на основі локального коригування висот глобальних моделей геоїда» є завершеною науковою працею, яка містить нові теоретичні положення і результати експериментальних досліджень направлені на розв'язання важливої науково-практичної задачі щодо підвищення точності методу GNSS-нівелювання. Представлена дисертаційна робота відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.2017 року “Про затвердження вимог до оформлення дисертації” та має достатньо високий рівень актуальності, логічності у структурі та обґрунтованості викладу наукових положень, а здобувач

філософії за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» (галузь знань 19 «Архітектура та будівництво»).

### Рецензент

Кандидат технічних наук, доцент, завідувач  
кафедри вищої геодезії та астрономії  
Національного університету  
«Львівська політехніка»



Богдан ДЖУМАН

Підпис к.т.н, доц. Джумана Б. Б. засвідчую

Вчений секретар НУ  
к.т.н, доцент



Роман БРИЛИНСЬКИЙ