

УДК 528.37

ТРЕВОГО І. С.¹, ЦЮПАК І. М.^{1*}, ВОЛЧКО П. І.²

¹ Інститут геодезії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, тел.: 032-258-27-60, e-mail: trevoho@gmail.com, *тел.: 097-304-82-03, e-mail: i_tsyupak@meta.ua

² НВФ “ДОКА”, вул. Залізняка, 17, Львів, Україна, 79057, тел. 032-232-3040

ДО МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ GNSS-НІВЕЛЮВАННЯ НА РОБОЧИХ ЕТАЛОНАХ

Розвиток технології GPS/GNSS спрямовується і у визначенні висот пунктів відносно фізичного тіла Землі – нормальних висот. Точність їх визначення за результатами GNSS-спостережень складається з двох частин: похибок визначення просторового місцезнаходження пункту, зокрема геодезичної висоти (відносно математичного тіла Землі), з опрацювання GNSS-спостережень; і похибок визначення або моделювання поверхні геоїда чи квазігеоїда. **Мета** цієї роботи – аналіз похибок визначення координат пункту, зокрема геодезичної висоти, технологією GNSS, а також розрахунок апіорної оцінки точності мережі геометричного нівелювання за програмою II класу, що необхідно для метрологічної атестації методик виконання GNSS-нівелювання на робочих еталонах. Такими еталонами можуть бути фундаментальні геодезичні мережі для атестації GNSS-приймачів. **Методика.** Метрологічне забезпечення робочого еталону для досліджень точності GNSS-нівелювання передбачає аналіз похибок визначення висоти пункту за спостереженнями GNSS і забезпечення контролю точності моделювання поверхні геоїда у цьому регіоні. Тому стаття складається із двох частин. У першій – аналізуються похибки визначення координат пунктів і досліджуються похибки визначення геодезичної висоти пункту залежно від тривалості сесії GNSS-спостережень (оскільки більшість похибок залежні від часу спостереження) та залежності похибки різниці висоти точки, визначеної у сесіях спостережень однакової тривалості, які виконані у різні дні для GNSS-векторів різної довжини. Вихідними даними для цих досліджень використані дві добові сесії спостережень, здійснені одночасно на чотирьох пунктах фундаментальної геодезичної мережі двочастотними приймачами. Один з пунктів вибраний за референсний, тому похибки визначення висот виконано для 3 пунктів на відстанях 10, 14 і 20 км від референсного. У другій частині статті для апіорної оцінки точності запроєктованої мережі геометричного нівелювання за програмою II класу визначаються вагові коефіцієнти для 11 реперів з розв'язку системи параметричних рівнянь методом найменших квадратів. Вихідними даними для цих розрахунків послужили довжини ходів між реперами вздовж доріг, виміряні на топографічній карті з урахуванням рельєфу, і величини граничних похибок випадкової і систематичної складових для нівелювання II класу. Геометричне нівелювання необхідне для контролю точності GNSS-нівелювання і, відповідно, для оцінки точності моделювання поверхні геоїда чи квазігеоїда. **Результати.** Із досліджень встановлено, що для визначення геодезичної висоти пункту з опрацювання GNSS-вимірів з похибкою біля 1 мм сесія спостережень повинна тривати не менше ніж 19 год. Між добовими сесіями GNSS-спостережень похибка визначення висоти становить близько 5 мм і це залежить не тільки від відстані між пунктами. Апіорна оцінка точності визначення висот реперів, серед яких є пункти фундаментальної геодезичної мережі, показує, що за заданих граничних похибок нівелювання, похибки висот реперів будуть у межах 0,8–2,0 мм. **Наукова новизна та практичне значення.** Здійснений аналіз похибок свідчить, що сумарна похибка GNSS-нівелювання і визначення нормальних висот пунктів фундаментальної мережі еталонного полігону може становити близько 3–5 мм. Це означає, що фундаментальна геодезична мережа може слугувати робочим еталонном для контролю точності методик виконання GNSS-нівелювання з моделюванням поверхні геоїда/квазігеоїда різними методами.

Ключові слова: GNSS-нівелювання; фундаментальна геодезична мережа;

Вступ. Постановка проблеми

Термін GNSS-нівелювання позначає альтернативний метод визначення висот квазігеоїда. У класичних (наземних) геодезичних методах висоти квазігеоїда необхідні для переобчислення

нормальних висот у геодезичні, щоб за геодезичними координатами (B, L, H) перейти до системи просторових прямокутних координат (X, Y, Z). Така декартова система зв'язана з відповідним референц-еліпсоїдом: локальним, наприклад, еліпсоїдом

Красовського, або геоцентричним (WGS-84 або GRS-80).

У зв'язку з широким застосуванням технології GNSS для визначення координат пунктів, яка, тепер, вже стала основною в геодезії, виявилось необхідним і можливим, з певною точністю, визначати нормальні H' (ортометричні h) висоти пунктів [Кучер О. В., Марченко О. М., Марченко Д. О., Засць І. М., 2012]. Слід зазначити, що практично вирішено [Кучер О. В., Куриляк І. С., Марченко О. М., 2009] питання визначення координат з необхідною точністю як у просторових локальних системах координат [Кучер О. В., Засць І. М., Стопхай Ю. А., Ренкевич О. В., 2002], так і в системах проєкції на площину (УСК-2000) за допомогою визначених параметрів трансформації координат [Карпінський Ю., Кучер О., Засць І., 2013]. Але визначення висот пунктів технологією GNSS у системі прийнятої рівневої поверхні з необхідною точністю є складнішою задачею. Не стільки через дещо (кілька міліметрів) меншої точності визначення вертикальної складової від планового місцезнаходження, скільки через точність моделювання самої рівневої поверхні або поверхні геоїда.

Аналіз останніх досліджень

Поверхня відліку ортометричних і нормальних висот реалізується середнім рівнем моря [Марченко О. М., Третяк К. Р., Ярема Н. П., 2013]. Її моделювання, тобто відновлення функції на основі дискретно заданих вимірів [Турчак Л. И., Плотников П. В., 2003], може бути виконано за даними, наприклад, гравіметричного знімання у відповідному регіоні (шляхом обчислення аномалій сили тяжіння і побудовою регіонального квазігеоїда) або моделлю гравітаційного поля Землі. Опрацювання геометричного нівелювання з урахуванням значень прискорення сили тяжіння дає змогу отримати ортометричні та нормальні висоти відносно середнього рівня моря [Марченко О. М., Третяк К. Р., Ярема Н. П., 2013]. Точність регіональної моделі геоїда, звичайно, вища [Кучер О. В., Марченко О. М., Марченко Д. О., Засць І. М., 2012] і залежить, переважно, від точності гравіметричного знімання і його докладності (роздільної здатності або щільності

точок). Можуть також застосовуватися градіометричні виміри низьких супутників, наприклад GOCE [Xu H., Zhang Y., Duan H., 2015], а на поверхні морів і океанів – супутникова альтиметрія [Rio M.-H., Hernandez F., 2004]. Останніми роками пункти і репери державної геодезичної мережі (I–IV класів) мають відповідної точності GPS-визначення і з використанням глобальних моделей геопотенціалу здійснено GPS-нівелювання [Кучер О. В., Марченко О. М., Марченко Д. О., Засць І. М., 2012]. Ці значення висот квазігеоїда, отримані з GNSS-нівелювання, також застосовують як виміряні величини для побудови або уточнення регіональних моделей квазігеоїда [Марченко О. М., Кучер О. В., Марченко Д. О., 2013]. Відомі [Марченко О. М., Кучер О. В., Ренкевич О. В., 2007] регіональні моделі квазігеоїда для території України. Результати порівняльного аналізу точності обчислення висот квазігеоїда в загальному для усіх GPS-пунктів державної геодезичної мережі (ДГМ) з використанням глобальних моделей (EGM08 і EGG08) та моделі українського квазігеоїда УКГ2007 показали [Кучер О. В., Марченко О. М., Марченко Д. О., Засць І. М., 2012], що глобальні моделі мають більшу стандартну середню квадратичну похибку (СКП) моделювання рівневої поверхні Балтійської системи висот 1977 р., ніж регіональна модель.

Якщо регіональна модель квазігеоїда не збудована, а глобальні гравітаційні моделі моделюють рівневу відлікову поверхню з недостатньою точністю через різницю в системах вихідних параметрів, то з певними похибками здійснюють інтерполювання висот квазігеоїда на поверхні між реперами, на яких виконані GNSS-визначення [Uzun S., Çakir L., 2006].

З GNSS-нівелювання висоти квазігеоїда можуть визначатися з різною точністю залежно від гравітаційної моделі і регіону. Для висотної мережі Чехії стандартні залишкові відхилення визначених висот квазігеоїда з GPS-нівелювання [Novak P., 2009], з використанням моделі EGM08 як поверхні квазігеоїда, становить 3,3 см. Дослідження [Тревого І. С., Цюпак І. М., 2015] показали, що на території еталонного лінійного базису система висот моделі EGM08 має систематичний зсув з Балтійською

системою висот 1977 р. на 12,5 см. Якщо систематичне зміщення усунути, стандартне відхилення становить 7,2 мм. Визначення відносних висот з опрацювання GNSS-вимірів можна отримувати з СКП ~ 5 мм при відстанях від референцного пункту до 3 км.

Постановка завдання. Мета

Аналіз публікацій свідчить про необхідність подальшого розвитку глобальних і регіональних моделей потенціалу сили тяжіння, підвищення їх точності. З іншого боку, вихідні дані для побудови регіональних моделей необхідно приводити до відповідної системи параметрів і розв'язання параметричних рівнянь здійснювати за певних умов [Марченко О. М., Третяк К. Р., Ярема Н. П., 2013], що забезпечить суміщення рівневих поверхонь регіональної моделі квазігеоїда і Балтійської системи висот 1977 р.

На цей час необхідно розробити нормативні документи, які регламентують виконання GPS/GNSS-нівелювання [Зубарев А. Э., 2012] і методика опрацювання цих вимірів для отримання результатів співрозмірних з даними геометричного нівелювання.

Обнадійливі результати (~ 5 мм) визначення відносних висот пунктів з опрацювання GPS/GNSS-вимірів [Тревого І. С., Цюпак І. М., 2015] отримані для відстаней до 3 км. Автори роботи [Зубарев А. Э., 2012] також вважають, що отримання відносних геодезичних висот з такою ж точністю можливе для відстаней до 25 км, що необхідно підтвердити додатковими дослідженнями. Відповідні дослідження можна виконувати на фундаментальній геодезичній мережі [Друзюк В., Мазур А., Тревого І., Цюпак І., 2010], пункти якої мають надійні просторові координати, отримані з багаторічних GPS/GNSS спостережень, і їх необхідно забезпечити даними геометричного нівелювання за програмою II класу. Прямі порівняння геодезичних і нормальних висот, а також застосування гравітаційних моделей Землі для моделювання поверхні геоїда/квазігеоїда дають змогу оцінювати точність GNSS-нівелювання та розробляти методика обчислення нормальних висот з опрацювання GNSS-вимірів. Так, фундаментальну геодезичну мережу, як робочий

еталон можна застосувати для досліджень точності методик GNSS-нівелювання. Пункти фундаментальної геодезичної мережі стають реперними точками з відомими геодезичними і нормальними висотами.

Метою цієї статті є створення висотної основи для досліджень точності відносного методу GNSS-нівелювання. Відповідно до мети завданнями досліджень цієї роботи встановимо: 1) оцінювання похибки визначення геодезичної висоти пунктів з опрацювання GNSS-вимірів, як одної з основних; 2) попередній розрахунок точності визначення висот пунктів фундаментальної геодезичної мережі геометричним нівелюванням за програмою II класу.

Методика та результати роботи.

GNSS-нівелювання з погляду метрології

Одним із завдань геодезичної метрології полягає у розробленні і метрологічній атестації методик виконання геодезичних вимірів [Спирidonov А. И.,]. До нових геодезичних вимірів належить і GNSS-нівелювання, методики виконання якого необхідно атестувати. Відхилення вимірюваної величини від еталонної можливе тільки за рахунок випадкових похибок вимірювань на допустиму величину, що пропорційна точності приладу. У разі використання непрямих вимірів, наприклад супутникових спостережень, необхідно забезпечити збереження еталонної одиниці вимірювань і під час опрацювання масиву спостережень за допомогою спеціальних комп'ютерних програм, де одиниці вимірювань присутні у фізичних, астрономічних і геодезичних сталих, які повинні відповідати стандартним одиницям вимірювань. У такому разі, можна порівняти, наприклад, відстань або перевищення між пунктами вимірювання наземними методами і визначені з опрацювання супутникових спостережень. Треба зазначити, що на наземні методи і супутникові технології вимірів неоднаково впливає земна гравітація і атмосфера [Тревого І. С., Цюпак І. М., 2014]. У геодезії, передовсім, визначають місцезположення точок за лінійними і/або кутковими вимірюваними величинами. У такому разі застосовуються певні моделі залежності вимірюваних величин від координат

точок та інших параметрів моделі, які визначаються. У наземних методах під час вимірювань, як правило, приладами реалізується топоцентрична горизонтальна система координат, одна з осей якої одразу й обов'язково суміщається з прямовисною лінією. У супутникових технологіях використовують кілька систем координат одночасно і визначені зв'язки між ними, тому що координати супутника визначаються в одній (геоцентричній інерціальній), координати пункту в другій (геоцентричній земній), а кінцеві точки вимірної величини в інших (супутниково-центричній та топоцентричній) системах координат. Тому зв'язки між системами координат повинні бути точно визначені, щоб не вносити додаткові похибки у результати, отримувані з супутникових визначень і наземних вимірів під час їх порівнювання.

Геометричне нівелювання – це прямі виміри перевищень між пунктами. Висоти пунктів або перевищення між ними, які визначаються із GNSS-нівелювання є непрямыми вимірами. За прямих вимірювань похибка перевищення залежить від похибок нанесення штрихів на нівелірних рейках, похибок рівнів на рейках, похибки за відхилення рейки від напряму силової або прямовисної лінії у точці стояння рейки, точності приладу (рівня) і його юстування, а також залишкової атмосферної рефракції та земної гравітації (поправка за кривину Землі), викликані нерівністю плеч на станції і його нагромадженням по секції. Під час обчислення нормальної висоти вводиться поправка за непаралельність прямовисних ліній по секції. У непрямих вимірах похибка отриманої величини, як виміру, залежить й від точності приладу, опрацювання прямих вимірів, а також від похибок моделей явищ (узгодженості їхніх параметрів і використаних сталих), задіяних у алгоритмі опрацювання і в параметричному рівнянні залежності вимірної величини від шуканих (визначуваних) параметрів, через які обчислюються величини, що вимірюються наземними методами.

На точність визначення висот точок технологією GNSS впливають такі чинники:

– рух фазового центру антени приймача GNSS по висоті;

– геометричне розміщення супутників над пунктами;

– похибки висот перманентних пунктів;

– похибки ефемерид GNSS-супутників [Костецька Я., Пішко Ю., 2013];

– вплив атмосфери (тропоферна та іоносферна рефракція).

Похибки, що впливають на точність GNSS-нівелювання – такі:

– похибка визначення геодезичної висоти пункту H з опрацювання GNSS-спостережень;

– похибка моделювання референційної поверхні рівня моря для визначення висот квазігеоїда;

– похибка визначення висоти пункту геометричним нівелюванням.

Для будь-яких вимірювань, враховуючи і визначення висот пунктів технологією GNSS, метрологічне забезпечення складається з організаційної, законодавчої, нормативної, наукової і технічної основ. Метрологічне забезпечення передбачає застосування метрологічних норм, проектування, створення та застосування технічних засобів, наприклад, фундаментальної геодезичної мережі, як еталонної, необхідної для досягнення єдності і потрібної точності вимірювань. Організаційна, нормативна і законодавча основи забезпечуються [Закон України, 2014], відповідно, існуванням метрологічної служби, державними та міжнародними еталонами і законами, нормами, постановами. Науковою основою метрологічного забезпечення є метрологія і теорія технології GNSS. Технічна основа метрологічного забезпечення складається з державних еталонів одиниць фізичних величин, робочих еталонів і зразкових засобів вимірної техніки. Для забезпечення метрологічної атестації приймачів GPS/GNSS та технологій GNSS-вимірювань, зокрема GNSS-нівелювання, необхідно оновити нівелірну мережу, яка охоплює пункти фундаментальної геодезичної мережі й еталонного лінійного базису наукового геодезичного полігону [Тревого І.С., Цюпак І. М., 2015].

Аналіз похибок визначення геодезичних висот з опрацювання GNSS-спостережень

Величина впливу більшості випадкових похибок на точність визначення координат

точки залежить від тривалості сесії GNSS-спостережень. Так можна зменшити вплив залишкових похибок:

- моделювання впливу тропосфери;
- руху фазового центру антени приймача;
- усунення впливу іоносфери;
- геометричного розміщення супутників над пунктами;
- похибки ефемерид.

Зазначимо, що дослідження залежності точності визначення координат пунктів у прямокутній системі координат (X, Y, Z), а також обчислення відстаней за спостереженнями GPS/GNSS вже виконувалися раніше багатьма дослідниками, зокрема [Костецька Я., Пішко Ю., 2009; Костецька Я., Пішко Ю., Гешель Д., 2011; Цюпак І., 2012].

У цьому дослідженні важливо встановити залежність похибки визначення висоти пункту від тривалості сесії GPS-спостережень і відстані між пунктами. Для аналізу використано добові спостереження трьох GNSS-векторів: VASL-ANDR, VASL-GOSH і VASL-TZSU, довжини яких відповідно – 10, 14 і 20 км. Геодезичні координати пунктів ANDR, GOSH і TZSU визначалися за сесіями GPS-спостережень, тривалість яких збільшували на 1 год. За точні значення висот пунктів прийнято ті, які визначені за добовими сесіями спостережень. На графіках (рис. 1 і рис. 2) наведено зміну похибки визначення геодезичної висоти H пунктів за сесіями тривалістю від 1 до 24 год.

Дослідження виконані на двох добових сесіях, названих 186 і 187. Відомо, що координати пунктів визначені за різними добовими сесіями відрізняються на 1–4 мм. На рис. 3 зображено різниці висот пунктів, визначених за сесіями різної тривалості між днями 186 і 187.

На графіках (див. рис. 1 і 2) видно, що похибки визначення висоти пунктів протягом доби описують “сінусоїди”, причому до 6 год сесії спостережень амплітуда коливань може сягати 30 мм, для сесій тривалістю до 16 год – до 5–10 мм, а для сесій тривалістю більше ніж 19 год – близько 1 мм. Тому для точних визначень геодезичних висот пунктів і, відповідно, висот квазігеоїда з GNSS-нівелювання сесія спостережень повинна тривати від 19 до 24 год.

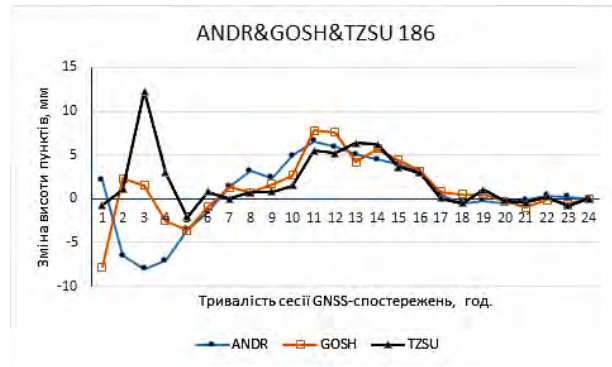


Рис 1. Графіки похибок визначення геодезичної висоти пунктів ANDR, GOSH і TZSU (сесія 186)
Fig. 1. Graphs errors of determination of the geodetic height of points ANDR, GOSH and TZSU (session 186)

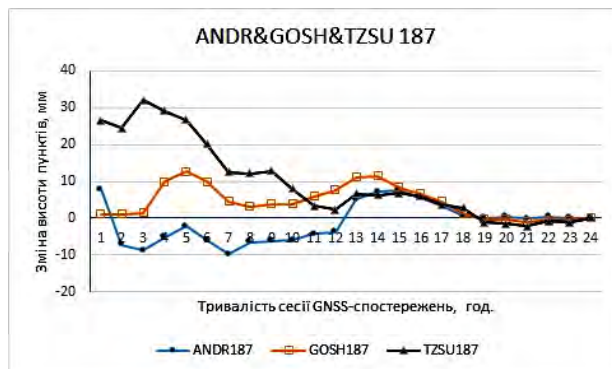


Рис 2. Графіки похибок визначення геодезичної висоти пунктів ANDR, GOSH і TZSU (сесія 187)
Fig. 2. Graphs errors of determination of the geodetic height of points ANDR, GOSH and TZSU (session 187)



Рис 3. Графіки різниць висот пунктів ANDR, GOSH і TZSU між сесіями 186 і 187
Fig. 3. Graphs differences of the heights point ANDR, GOSH and TZSU between sessions 186 and 187

Зазначимо, що між добовими сесіями GNSS-спостережень (див. рис. 3) похибка визначення висоти становить біля 5 мм і це залежить не тільки від відстані між пунктами.



Рис. 4. Нівелювання пунктів фундаментальної геодезичної мережі
 Fig. 4. Geometric spirit leveling of the points of fundamental geodetic network

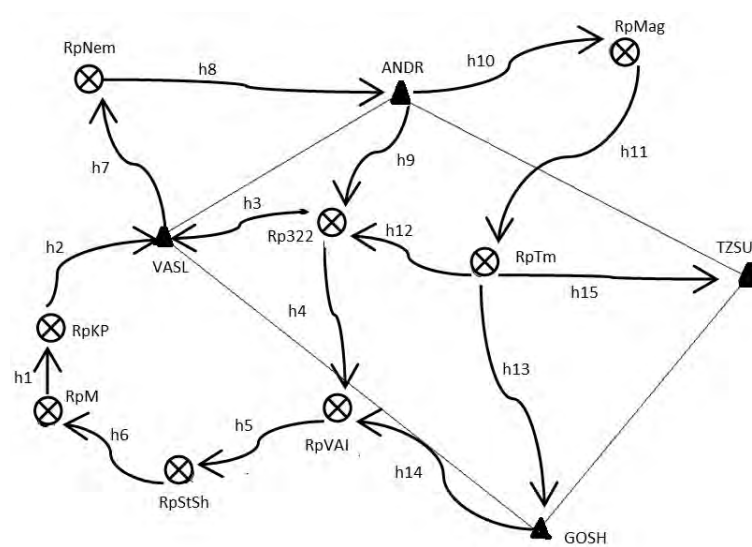


Рис. 5. Схема ходів нівелювання пунктів фундаментальної геодезичної мережі за програмою II класу
 Fig. 5. Scheme of geometric leveling of points fundamental geodetic network by means the program of class II

Розрахунок апіорної точності геометричного нівелювання за програмою II класу

Нівелювання за програмою II класу буде виконуватися вздовж доріг між нівелірними реперами через пункти VASL, ANDR, GOSH і TZSU фундаментальної геодезичної мережі (рис. 4). Схему ходів подвійного нівелювання і реперів наводимо на рис. 5.

Для апіорної оцінки точності визначення висот реперів і пунктів фундаментальної геодезичної мережі необхідно визначити ваги вимірних величин. Вихідними даними для цих розрахунків послуговували довжини ходів між реперами вздовж доріг, виміряні на топографічній карті з урахуванням рельєфу. У нашому випадку вимірними величинами є перевищення h_{ij} між відповідними реперами

нівелювання. Обчислення СКП перевищень по кожному подвійному ходу виконується за величиною випадкової η та систематичної σ похибок вимірювань для певного класу нівелювання за формулою [Яковлев Н. В., 1989]

$$m^2 = \eta^2 L + \sigma^2 L^2, \quad (1)$$

де m – СКП подвійного ходу нівелювання. Для II класу нівелювання випадкова похибка $\eta = 2$ мм на один кілометр ходу, а систематична на порядок менша – $\sigma = 0,2$ мм [Інструкція по нивелированию, 1990]. У табл. 1 наведено довжини ходів, СКП та ваги P_i ходів нівелювання між реперами.

Таблиця 1

Обчислення ваг подвійних ходів нівелювання

Table 1

Calculating weight of measurements of different heights of the benchmarks points

| № з/п | Хід нівелювання | | Довжина ходу, км | m , мм | P_i |
|-------|-----------------|--------|------------------|----------|-------|
| | Від | До | | | |
| 1 | RpM | RpKP | 3,3 | 3,69 | 7,33 |
| 2 | RpKP | VASL | 7,5 | 5,68 | 3,10 |
| 3 | Rp322 | VASL | 4,8 | 4,49 | 4,97 |
| 4 | Rp322 | RpVAI | 6,9 | 5,43 | 3,39 |
| 5 | RpVAI | RpStSh | 4,0 | 4,08 | 6,01 |
| 6 | RpStSh | RpM | 5,5 | 4,82 | 4,31 |
| 7 | VASL | RpNem | 3,5 | 3,81 | 6,90 |
| 8 | RpNem | ANDR | 11,5 | 7,16 | 1,95 |
| 9 | ANDR | Rp322 | 6,6 | 5,30 | 3,55 |
| 10 | ANDR | RpMag | 9 | 6,26 | 2,55 |
| 11 | RpMag | RpTm | 9,5 | 6,45 | 2,40 |
| 12 | RpTm | Rp322 | 6,3 | 5,18 | 3,73 |
| 13 | RpTm | GOSH | 13,7 | 7,89 | 1,60 |
| 14 | GOSH | RpVAI | 6,2 | 5,13 | 3,80 |
| 15 | RpTm | TZSU | 8,5 | 6,07 | 2,71 |

Зазначимо, що секції подвійного нівелювання мають довжину не більше ніж 5 км, як правило, 3–4 км, але вони об'єднані між основними реперами, висоти, яких визначаються. Згідно зі схемою нівелювання (рис. 5) є 12 реперів, з них один RpM – вихідний і 11, висоти яких визначаються.

Ваги вимірів (табл. 1) необхідні для обчислення елементів матриці вагових коефіцієнтів Q_{ii} (табл. 2), яку отримують розв'язанням параметричних рівнянь методом найменших квадратів [Яковлев Н. В., 1989]. Оцінка СКП одиниці ваги μ обчислюється за формулою

$$\mu = m \sqrt{Q_{max}}, \quad (2)$$

де $m = 2,23$ мм – обчислена за формулою (1) при $L = 1$ км, а Q_{max} – ваговий коефіцієнт Q_{ii} (див. табл. 2 і рис. 5) найслабшої лінії нівелювання, тобто максимальний.

Таблиця 2

Визначені вагові коефіцієнти і СКП реперів

Table 2

Determinating the weighting factors and the rms errors of repers

| № з/п | Репер | Q_{ii} | m_{hi} мм |
|-------|--------|----------|-------------|
| 1 | RpKP | 0,1215 | 0,78 |
| 2 | VASL | 0,2903 | 1,20 |
| 3 | Rp322 | 0,3145 | 1,25 |
| 4 | RpVAI | 0,2714 | 1,16 |
| 5 | RpStSh | 0,1890 | 0,97 |
| 6 | RpNem | 0,3941 | 1,40 |
| 7 | ANDR | 0,4387 | 1,48 |
| 8 | RpMag | 0,5720 | 1,69 |
| 9 | RpTm | 0,4399 | 1,48 |
| 10 | GOSH | 0,4455 | 1,49 |
| 11 | TZSU | 0,8088 | 2,01 |

Априорна оцінка точності визначення висоти кожного репера і пунктів фундаментальної геодезичної мережі, як СКП m_{hi} обчислена за формулою

$$m_{hi} = \mu \sqrt{Q_{ii}}. \quad (3)$$

Згідно з результатами, наведеними у табл. 2, найбільшу похибку з геометричного нівелювання, можна очікувати у пункті TZSU. Враховуючи, що похибка висоти пункту 2 мм, можна вважати, що геометричне нівелювання за програмою II класу є достатнім для забезпечення метрологічної атестації методики GNSS-нівелювання і забезпечення єдності вимірювань і визначених перевищень між пунктами за допомогою, відповідно, геометричного і GNSS-нівелювання.

Наукова новизна і практична значущість

Здійснений аналіз похибок свідчить, що сумарна похибка GNSS-нівелювання і визначення нормальних висот пунктів фундаментальної мережі еталонного полігону може становити біля 3–5 мм. Це означає, що фундаментальна геодезична мережа може слугувати робочим еталоном для контролю точності виконання GNSS-нівелювання з моделюванням поверхні геоїда/квазігеоїда різними методами.

Результати досліджень показують, що основну величину похибки GNSS-нівелювання становить похибка моделювання поверхні геоїда/квазігеоїда. Так, краще визначати відносні висоти, або перевищення над референцним (опорним) пунктом.

Висновки

Виконані у цій статті дослідження показали, що:

- 1) точність визначення геодезичної висоти пункту з опрацювання GNSS-вимірів за сесіями спостережень тривалістю не менше ніж 19 год може становити близько 1 мм;
- 2) похибка визначення висоти пункту за добовими сесіями GNSS-спостережень для двох різних днів може досягати 5 мм;
- 3) геометричне нівелювання за програмою II класу може забезпечити контроль точності GNSS-нівелювання за різних методів моделювання поверхні геоїда чи квазігеоїда.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Друзюк В. Сучасні геодезичні прилади і технології : науково-технічне метрологічне забезпечення / В. Друзюк, А. Мазур, І. Тревого, І. Цюпак // Метрологія та прилади. – 2010. – № 3. – С. 19–26.
- Закон України “Про метрологію та метрологічну діяльність” // Відомості Верховної Ради (ВВР). – від 25.07.2014. – 2014, № 30, с. 2350, ст. 1008.
- Зубарев А. Э. Современные проблемы обеспечения территорий высокоточными значениями высот / А. Э. Зубарев, С. В. Лебедев, И. Е. Надеждина, Ю. Е. Федосеев // Геопрофи. – 2012. – № 3. – С. 54–57.
- Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. – М. : Недра. – 1990. – 160 с.
- Карпінський Ю. Обґрунтування методу та побудова трансформаційного поля перетворення координат між системами СК-42 та УСК2000. [Текст] / Ю. Карпінський, О. Кучер, І. Засць // Геодезія, картографія та аерофотознімання. – 2013. – Вип. 78. – С. 169–172.
- Костецька Я. До питання точності довжин векторів, отриманих за результатами відносних GPS-спостережень двочастотними приймачами / Я. Костецька, Ю. Пішко // Сучас. досягнення геодез. науки та вир-ва : зб. наук. пр. Зах. геодез. т-ва УТГК. – 2009. – Вип. 1. – С. 92–97.
- Костецька Я. Залежність точності визначення положення пунктів у супутникових мережах від тривалості сеансів спостережень / Я. Костецька, Ю. Пішко, Д. Гешель // Сучас. досягнення геодез. науки та вир-ва. – 2011. – Вип. 2. – С. 96–102.
- Костецька Я. Вплив типу ефемерид на точність визначення положення пунктів супутникових мереж / Я. Костецька, Ю. Пішко // Сучас. Досягнення геодез. науки та вир-ва : зб. наук. пр. Зах. геодез. т-ва УТГК. – 2013. – Вип. 1. – С. 67–69.
- Кучер О. В. Перетворення координат із державної геодезичної системи у світову систему WGS-84 / О. В. Кучер, І. М. Засць, Ю. А. Стопхай, О. В. Ренкевич // Вісн. геодез. та картогр. – 2002. – № 3. – С. 8–14.
- Кучер О. В. Про перетворення координат із системи СК-42 в систему УСК-2000 [Текст] / О. В. Кучер, І. С. Куриляк, О. М. Марченко // Вісник геодезії та картографії. – 2009. – № 2. – С. 6–13.
- Кучер О. В. Про використання глобальних моделей EGM08 та EGG08 для визначення висот квазігеоїда на територію України / О. В. Кучер, О. М. Марченко, Д. О. Марченко, І. М. Засць // Вісник геодезії і картографії. – 2012. – № 4. – С. 13–17.
- Марченко О. М. Результати побудови квазігеоїда для регіону України (УКГ2006) / О. М. Марченко, О. В. Кучер, О. В. Ренкевич // Вісн. геодезії та картографії. – 2007. – № 2. – С. 3–13.
- Марченко О. М. Результати уточнення квазігеоїда УКГ2012 для території України / О. М. Марченко, О. В. Кучер, Д. О. Марченко // Вісник геодезії і картографії. – 2013. – № 3. – С. 3–10.
- Марченко О. М. Референсні системи в геодезії : навч. посібник / О. М. Марченко, К. Р. Третяк, Н. П. Ярема. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 216 с.
- Тревого І. С. Проблеми координатно-часового простору при супутникових і наземних геодезичних вимірюваннях / І. С. Тревого, І. М. Цюпак // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів : Нац. університет “Львівська політехніка”. – 2014. – Вип. II (28). – С. 24–28.
- Тревого І. С. Аналіз результатів нових експедицій на метрологічних об’єктах наукового геодезичного полігону / І. С. Тревого, І. М. Цюпак // Сучасні

- досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів : Нац. університет “Львівська політехніка”. – 2015. – Вип. I (29). – С. 66–69.
- Турчак Л. И. Основы численных методов : учеб. пособ. / Л. И. Турчак, П. В. Плотников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 304 с.
- Цюпак І. М. Точність визначення координат пунктів і довжин ліній за сесіями GPS-спостережень різної тривалості / І. М. Цюпак // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів : Видавництво Львівської політехніки. – 2012. – Вип. I (23). – С. 57–59.
- Яковлев Н. В. Высшая геодезия / Н. В. Яковлев : учеб. для вузов. – М. : Недра. – 1989. – 445 с.
- Novak P. Testing EGM08 using Czech GPS/leveling data / P. Novak, J. Klokocnik, J. Kostealecky, A. Zeman / Newton's Bulletin. – 2009. – № 4. – С. 126–132.
- Rio M.-H. A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a geoid model / M.-H. Rio, F. Hernandez // Journal of Geophysical Research. – 2004. – Vol. 109. – Pp. C12032, doi :10.1029 / 2003JC002226.
- Uzun S. The Reliability of Surface Fitting Methods in Orthometric Height Determination from GPS Observations / Sibel Uzun, Leyla Çakir / Paper proceedings on XXIII FIG Congress “Shaping the Change”. – Munich, Germany, October 8–13, 2006 (http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2006/papers/ps05_05/ps05_05_04_uzun_cakir_0686.pdf).
- Xu H. Gravity gradient distribution in mainland China from GOCE satellite gravity gradiometry data / Haijun Xu, Yongzhi Zhang, Hurong Duan // Geodesy and Geodynamics. – 2015. – Vol. 6, Issue 1. – P. 41–45.

ТРЕВОГО И. С.¹, ЦЮПАК И. М.^{1*}, ВОЛЧКО П. И.²

¹ Институт геодезии, Национальный университет “Львовская политехника”, ул. С. Бандеры, 12, Украина, 79013, тел.: 032-258-27-60, e-mail: trevoho@gmail.com, * тел.: 097-304-82-03, e-mail: i_tsyupak@meta.ua

² НПФ “ДОК”, ул. Железняка, 17, Украина, 79057, тел. 032-232-3040

К МЕТРОЛОГИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ GNSS-НИВЕЛИРОВАНИЯ НА РАБОЧИХ ЭТАЛОНАХ

Развитие технологии GPS / GNSS направляется и в определении высот пунктов относительно физического тела Земли – нормальных высот. Точность их определения по результатам GNSS-наблюдений состоит из двух частей: погрешностей определения пространственного местонахождения пункта, в частности геодезической высоты (относительно математического тела Земли), по обработке GNSS-наблюдений; и погрешностей определения или моделирования поверхности геоида или квазигеоида. Цель данной работы анализ погрешностей определения координат пункта, в частности геодезической высоты, технологии GNSS, а также расчет априорной оценки точности сети геометрического нивелирования по программе II класса, что необходимо для метрологической аттестации методик выполнения GNSS-нивелирования на рабочих эталонах. Такими эталонами могут быть фундаментальные геодезические сети для аттестации GNSS-приемников. **Методика.** Метрологическое обеспечение рабочего эталона для исследований точности GNSS-нивелирования, включая анализ погрешностей определения высоты пункта по наблюдениям GNSS и обеспечения контроля точности моделирования поверхности геоида в данном регионе. Поэтому статья состоит из двух частей. В первой анализируются погрешности определения координат пунктов и исследуются погрешности определения геодезической высоты пункта в зависимости от продолжительности сессии GNSS-наблюдений (поскольку большинство погрешностей зависят от времени наблюдения) и зависимости погрешности разницы высоты точки, определенной в сессиях наблюдений одинаковой продолжительности, выполненные в разные дни для GNSS-векторов разной длины. Исходными данными для этих исследований использованы две суточные сессии наблюдений, совершенные одновременно на четырех пунктах фундаментальной геодезической сети двухчастотных приемниками. Один из пунктов выбран как референцный, поэтому погрешности определения высот выполнено для 3 пунктов на расстояниях 10, 14 и 20 км от референцного. Во второй части статьи для априорной оценки точности запроэктированной сети геометрического нивелирования по программе II класса определяются весовые коэффициенты для 11 реперов из решения системы параметрических уравнений методом наименьших квадратов. Исходными данными для этих расчетов послужили длины ходов между реперами вдоль дорог, измеренные на топографической карте с учетом рельефа и величины предельных погрешностей случайной и систематической составляющих для нивелирования II класса. Геометрическое нивелирование необходимое для контроля точности GNSS-

нивелювання і, відповідно, для оцінки точності моделювання поверхності геоїда або квазігеоїда. **Результати.** С досліджень встановлено, що для визначення геодезическої висоти пункту по обробці GNSS-вимірювань з погрешністю около 1 мм сесія спостережень повинна тривати не менше 19 ч. Між суточними сесіями GNSS-спостережень погрешність визначення висоти становить около 5 мм і це залежить не тільки від відстані між пунктами. Априорна оцінка точності визначення висот реперів, серед яких є пункти фундаментальної геодезическої мережі, показує, що при заданих граничних погрешностях нивелювання погрешності висот реперів будуть в межах 0.8 – 2.0 мм. **Наукова новизна і практичне значення.** Проведений аналіз помилок свідчить, що сумарна погрешність GNSS-нивелювання і визначення нормальних висот пунктів фундаментальної мережі еталонного полігона може становити около 3 – 5 мм. Це означає, що фундаментальна геодезическа мережа може служити робочим еталоном для контролю точності методик виконання GNSS-нивелювання з моделюванням поверхності геоїда / квазігеоїда різними методами.

Ключові слова: GNSS-нивелювання; фундаментальна геодезическа мережа.

TREVOHO I. S.¹, TSYUPAK I. M.^{1*}, VOLCHKO P. I.²

¹ Institute of Geodesy, Lviv Polytechnic National University, S. Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013 tel.: 032-258-27-60, e-mail: trevoho@gmail.com, * tel.: 097-304-82-03, e-mail: i_tsyupak@meta.ua

² SPF "Doc" Zaluznjaka str., 17, Lviv, Ukraine, 79057, Tel. 032-232-3040

METROLOGICAL PROVISION OF GNSS-LEVELING ON WORKING STANDARDS

Widespread use of GPS / GNSS technology sets the task of determining the normal (orthometric) heights of points. We know that it is necessary to determine the initial level surface – the surface of the geoid / quasigeoid. Determination of the quasigeoid surface can be performed by: 1) a gravimetric readout in the relevant region and building the regional geoid / quasigeoid; 2) a model of potential of gravitational field of the Earth; 3) an interpolation of quasigeoid's heights on a surface given by leveling reference points, on which GNSS-leveling is carried. Most often the quasigeoid surface is determined with a global gravity model, for example EGM08, the standard deviation of this quasigeoid from the adopted system of heights, depending on the region, is from 3.5 to 25 cm. In the previous studies authors of the article show that the determination of the relative heights from processing of GNSS-observations is performed with the mean square error of about 5 mm at a distance of 3 km. The goal of the article is the calculation of the possible accuracy of determination of heights of the basic geodetic network points of the reference polygon both from geometric leveling with the Program of II class and from GNSS-definitions. The task of the practical metrology is in providing the compliance of the units of measurement of the device to the reference ones and in using the methods or methodologies of measuring performance that retain this unit of measurement. In case of using indirect measurements, which are satellite observations, it is necessary to provide the preservation of the standard unit of measurements during the measurements themselves, while processing the array of observations and during obtaining the resulting value. Then you can compare the distance or elevations between points, measured by ground-based methods and by processing satellite observations. It also necessary to consider that the terrestrial methods and satellite technologies of measurements are not equally influenced by the Earth's gravity and the atmosphere. The accuracy of determination of points heights with the use of GNSS technology is influenced by several key factors, but the size of the errors mostly depends on the duration of observations. Therefore we will explore the change of the error of height determination caused by the change of the observation session duration. The accuracy of GNSS-leveling attestation as a method is influenced by such errors: definition of geodetic point's height with processing of GNSS-observations; determination of the point's height by geometric leveling; restoration of the reference surface of the sea level to determine the quasigeoid heights. To analyze the value of the error of point's height determination using GNSS technology, daily observations of three GNSS-vectors, whose length were respectively – 10, 14 and 20 km, were performed. Geodetic coordinates of points were determined by sessions of GNSS-observations, the duration of which was increased gradually by 1 hour. For accurate values of points heights have been taken those, which were determined by the daily sessions of observations. The errors in determining the heights of points during a day describe sinusoids, moreover, with up to 6 hours of the session of observations the oscillation amplitude can reach 30 mm, for sessions lasting up to 16 hours – 5–10 mm and for sessions lasting more than 19 hours – about 1 mm. Therefore, to receive accurate definitions of geodetic points' heights and, accordingly, heights of quasigeoid using GNSS-leveling, the observation session should last from 19 to 24 hours. Between the

daily sessions of GNSS-observation, the error the height determination is about 5 mm and it depends not only on the distance between points. The heights of quasigeoid, as the heights of points from GNSS-leveling, are always defined as absolute, that is, from the accepted level surface. The position of the level surface (Baltic system of heights 1977) is determined with bigger error, than the geodetic heights H from the surface of the ellipsoid (WGS-84), what can be concluded from the research. This way, it is proposed to determine the relative heights or elevations over the reference point. The study of definition accuracy of points' heights from processing GNSS-observations prove that if daily sessions of observation are performed, the error of determination of geodetic point's height can reach up to 5 mm. Thus, the accuracy of GNSS-leveling, that is, of determination of the geoid's height, can increase the error by 5 mm at a distance of 10 km.

Keywords: GNSS-leveling; fundamental geodetic network;

REFERENCES

- Druzjuk V., Mazur A., Trevoho I., Tsyupak I. *Suchasni geodezychni prylady i tehnologii': naukovo-tehnichne metrologichne zabezpechennja* [Modern surveying instruments and technology, scientific and technical metrological provision]. *Metrologija ta prylady* [Metrology and instruments]. 2010, no.3, pp. 19–26.
- Zakon Ukrainy "Pro topografo-heodezychnu i kartografichnu diyal'nist"* [The Law of Ukraine "On surveying and mapping activities"]. KМУ. Resolution no. 379, May 27, 2015
- Zubarev A. Je., Lebedev S.V., Nadezhkina I.E., Fedoseev Ju.E. *Sovremennye problemy obespechenija territorij vysokotochnymi znachenijami vysot.* [Modern problems of areas with precision values of heights]. *Geoprofi* [Geoprofi]. 2012, no. 3, pp. 54–57.
- Instrukcija po nivelirovaniju I, II, III i IV klassov* [Manual leveling I, II, III and IV klassov]. *M. : Nedra* [Moscow: Nedra]. 1990, 160 p.
- Karpins'kyj Yu., Kucher O., Zayets' I. *Obgruntuvannya metodu ta pobudova transformatsijnogo polya peretvorennya koordynat mizh systemamy SK-42 ta USK2000* [Justification of the method of transformation and building of the field coordinate transformation between systems SC-42 and USK2000] [Text] *Geodesy, cartography and aerial photography.* 2013, issue78, pp. 169–172.
- Kostec'ka Ja., Pishko Ju. *Do pytannja tochnosti dovezlyn vektoriv, otrymanyh za rezul'tatamy vidnosnyh GPS-sposterezhen' dvochastotnymy pryjmachamy* [On the question of the accuracy of the lengths of the vectors obtained results relative observation dual-frequency GPS-receivers]. *Suchas. dosjagnennja geodez. nauky ta vyr-va: zb. nauk. pr. Zah. geodez. t-va UTGK* [Modern achievements of geodetic science and industry: Coll. Science. pr. UTHK Western geodesic company]. 2009, issue 1, pp. 92–97.
- Kostec'ka Ja., Pishko Ju., Geshel' D. *Zalezhnist' tochnosti vyznachennja polozhennja punktiv u suputnykovyh merezhah vid tryvalosti seansiv sposterezhen'* [The dependence of the accuracy of the paragraphs in satellite networks duration of observation sessions]. *Suchas. dosjagnennja geodez. nauky ta vyr-va* [Modern achievements of geodetic science and industry]. 2011, issue 2, pp. 96–102.
- Kostec'ka Ja., Pishko Ju., *Vplyv typu efemeryd na tochnist' vyznachennja polozhennja punktiv suputnykovyh merezh* [Influence of the type of ephemerides on the accuracy of paragraphs satellite networks]. *Suchas. dosjagnennja geodez. nauky ta vyr-va: zb. nauk. pr. Zah. geodez. t-va UTGK* [Modern achievements of geodetic science and industry]. 2013, issue 1, pp. 67–69.
- Kucher O. V., Zayets' I. M., Stopkhay Yu. A., Renkevych O. V. *Peretvorennja koordynat iz derzhavnoyi heodezychnoyi systemy u svitovu systemu WGS-84* [The transformation of the state geodetic coordinate system into the global system WGS-84]. *Visnyk heodeziyi ta kartografiji* [Journal of Geodesy and Cartography]. 2002, no. 3, pp. 8–14.
- Kucher O. V., Kurylyak I. S., Marchenko O. M. *Pro peretvorennja koordynat iz systemy SK-42 v systemu USK-2000* [On the coordinate transformation from the system IC-42 in USC-2000] [Text], *Visnyk heodeziyi ta kartografiji* [Journal of Geodesy and Cartography]. 2009, no. 2, pp. 6–13.
- Kucher O. V., Marchenko D. O., Zajec' I. M. *Pro vykorystannja global'nyh modelej EGM08 ta EGG08 dlja vyznachennja vysot kvazigeoi'da na terytorijuUkrai'ny* [On the use of global models EGM08 and EGG08 to determine the heights quasigeoid to Ukraine]. *Visnyk geodezii' i kartografii'* [Bulletin of Surveying and kartografy]. 2012, no. 4, pp. 13–17.
- Marchenko O. M., Kucher O. V., Renkevych O. V. *Rezul'taty pobudovy kvazigeoi'da dlja regionu Ukrai'ny (UKG2006)* [Results for constructing quasigeoid region of Ukraine (UKH2006)]. *Visn. geodezii' ta kartografii* [Bulletin of Surveying and kartografy]. 2007, no. 2, pp. 3–13.

- Marchenko O. M., Kucher O. V., Marchenko D. O., *Rezultaty utocnennja kvazigeoi da UKG2012 dlja terytorii Ukrainy* [Results for clarification quasigeoid UKH2012 in Ukraine]. *Visnyk geodezii i kartografii* [Bulletin of Surveying and kartografy]. 2013, no. 3, pp. 3–10.
- Marchenko O. M., Tretjak K.R., Jarema N.P. *Referencni systemy v geodezii: navch. posibnyk* [The referents systems in geodesy, teach. Manual]. *L'viv: Vydavnytvo L'vivs'koi politehniky* [Lviv Polytechnic National University Publishing House], 2013, 216 p.
- Trevoho I. S., Tsyupak I. M. *Problemy koordynatno-chasovogo prostoru pry suputnykovyh i nazemnyh geodezychnyh vymirjuvannjah* [Coordinate and time in space satellite and terrestrial geodetic measurements]. *Suchasni dosjagnennja geodezychnoi nauky ta vyrobnyctva* [Modern achievements of geodetic science and industry]. *L'viv: Nac. universytet "L'vivs'ka politehnika"* [Lviv Polytechnic Nat. University]. 2014, issue II (28), pp. 24–28.
- Trevoho I. S., Tsyupak I. M. *Analiz rezul'tativ novyh ekspedycij na metrologichnyh ob'ektah naukovogo geodezychnogo poligonu* [Analysis of new expeditions to sites metrological research surveying Landfill]. *Suchasni dosjagnennja geodezychnoi nauky ta vyrobnyctva*. L'viv: Nac. universytet "L'vivs'ka politehnika" [Lviv Polytechnic Nat. University]. 2015, issue I (29), pp. 66–69.
- Turchak L. I., Plotnikov P.V. *Osnovy chislennyh metodov* [Basics of numerical methods]. *ucebn. posob. – 2-e izd., pererab. i dop.*- M.: FIZMATLIT, 2003, 304 p. – ISBN 5-9221-0153-6.
- Tsyupak I. M. *Tochnist' vyznachennja koordynat punktiv i dozhyn linij za sesijamy GPS-spостerezhen' riznoi tryvalosti* [The accuracy of coordinates of points and lengths of lines for GPS-observation sessions of varying lengths]. *Suchasni dosjagnennja geodezychnoi nauky ta vyrobnyctva* [Modern achievements of geodetic science and industry]. L'viv: Vydavnytvo L'vivs'koi politehniky, 2012, issue I (23), pp. 57–59.
- Jakovlev N. V. *Vysshaja geodezija. Uch. dlja vuzov* [Higher Geodesy. Textbook for vuzov]. Moscow: Nedra, 1989, 445 p.
- Novak P., J. Klokocnik, J. Kostelecky, A. Zeman *Testing EGM08 using Czech GPS/leveling data*. *Newton's Bulletin*, 2009, no. 4, pp. 126–132, ISSN 1810-8555.
- Rio M-H., Hernandez F. *A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a geoid model*. *Journal of Geophysical Research*. 2004, Vol. 109, pp. C12032, doi:10.1029/2003JC002226.
- Uzun S. *The Reliability of Surface Fitting Methods in Orthometric Height Determination from GPS Observations*. Sibel Uzun, Leyla Çakir. Paper proceedings on XXIII FIG Congress "Shaping the Change".- Munich, Germany, October 8-13, 2006 (http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2006/papers/ps05_05/ps05_05_04_uzun_cakir_0686.pdf)
- Haijun Xu, Yongzhi Zhang, Hurong Duan. *Gravity gradient distribution in mainland China from GOCE satellite gravity gradiometry data*. *Geodesy and Geodynamics*. 2015, V. 6, Issue 1, pp. 41–45.

Надійшла 05.11.2015 р.