

ДИСКУСІЇ

УДК 528.48

Костянтин БУРАК¹, Костянтин ЯРОШ²

¹ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, Івано-Франківськ, 76019, Україна, е-пошта: burak4111945@gmail.com.

² Одеський національний політехнічний університет, проспект Шевченка, 1, 65044, Одеса, е-пошта: aroshkonst@gmail.com.

<https://doi.org/10.23939/istcgcap2021.93.085>

ПРО ПЕРСПЕКТИВИ АСТРОНОМО-ГЕОДЕЗИЧНОГО НІВЕЛЮВАННЯ ДЛЯ КООРДИНАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГЕОДИНАМІЧНИХ ТА ТЕХНОГЕННИХ ПОЛІГОНІВ

Мета цієї роботи – теоретично обґрунтувати необхідність продовження робіт на Україні зі створення зенітних систем та астрономо-геометричного нівелювання з використанням Глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) та приладів, які забезпечують точність вимірів відхилень виска $0,1-0,2'' \div 0,2''$ для вивчення неотектонічних процесів на геодинамічних полігонах і на техногенних, які створюють для побудови геодезичної основи для будівництва та експлуатації надзвичайно важливих об'єктів. Методику досягнення мети забезпечено теоретичними дослідженнями наявних способів астрономо-геометричного нівелювання, сучасних методів прогнозу неотектонічних процесів, точності ГНСС та геометричного нівелювання. Основні результати – встановлено теоретичну можливість використання повторного астрономо-геометричного нівелювання для оцінки змін радіусів кривизни еквіпотенціальних поверхонь, контролю результатів геометричного і ГНСС-нівелювання. Наукова новизна: теоретично обґрунтовано можливість використання повторного астрономо-геометричного нівелювання спеціально створених профілів на геодинамічних полігонах для оцінки змін радіусів кривизни еквіпотенціальних поверхонь, з якими сучасні наукові гіпотези пов'язують можливість прогнозу землетрусів, контролю ГНСС і геометричного нівелювання з використанням геоїдальної складової на цих профілях, ідею синхронних спостережень із використанням зеніт-систем при астрономо-геометричному нівелюванні.

Ключові слова: відхилення прямовисних ліній; зеніт-системи; ГНСС; геодезичні та ортометричні висоти; астрономічне нівелювання.

Вступ

Аналіз літературних джерел показує, що астрономічне нівелювання є найбільш точним і оперативним способом для побудови профілю геоїда на геодинамічних і техногенних полігонах. Досягнута точність $0,1''$ визначення складових абсолютного значення відхилення виска на пункті менш ніж за пів-години, крім розв'язку традиційних задач з визначення фігури Землі, дозволяє за результатами повторного астрономічного нівелювання спеціально створених профілів визначати з міліметровою точністю форму геопотенціальних поверхонь і зміни форми. А саме з цими змінами сучасні наукові гіпотези пов'язують катастрофічні деформації земної поверхні, зокрема землетруси. Результати астрономо-геометричного нівелювання дають можливість також контролювати геомет-

ричне нівелювання за результатами ГНСС нівелювання і навпаки, контролювати і оцінювати точність ГНСС нівелювання за результатами геометричного, що можливо врахувати при роботі методик створення регіональної висотної основи гео-техногенних полігонів.

Запропонована ідея контрольного варіанту класичного астрономічного способу визначення змін величини кута нахилу прямовисних ліній між пунктами шляхом синхронних спостережень, яка значно спрощує підготовку даних до початку вимірів (не вимагає складання ефемерид зірок), збільшує їхню оперативність та надає можливість додаткового контролю й підвищення точності.

Ще в 1995 р, формулюючи основні напрямки розвитку геодезичної астрономії в роботі [Краснорилов и др., 1995] автори в якості

першочергової задачі сформулювали необхідність розробки методики визначення відхилень прямовисних ліній з точністю 0,1–0,2" для вивчення закономірностей їхніх змін, для встановлення зв'язків між астрономічною і геодезичними системами координат, приведення результатів вимірів до певної епохи відліку координат і гравітаційного потенціалу, правильної інтерпретації результатів повторного нівелювання при вивченні неотектонічних процесів. Така ж точність потрібна і в геодезичних роботах для будівництва та експлуатації сучасних унікальних споруд, і саме таку точність забезпечує розроблений в університетах Гамбурга й Цюріха метод, що ґрунтується на вимірюваннях із використанням цифрових зенітних систем.

Виклад основного матеріалу

При виконанні інженерно-геодезичних робіт з вишукувань, створенні розмічувальної основи для будівництва, геодезичному обслуговуванні та контролі монтажних робіт з відносною точністю 10^{-4} – 10^{-5} ÷ 10^{-5} (до 1 мм на 100 м), ГПЗ в межах будівельного або промислового майданчика, за невеликих кутів нахилу в геодезичній мережі, переважно приймалось однорідним. Проте, виконання інженерно-геодезичних робіт при будівництві та монтажі обладнання на сучасних унікальних об'єктах таких як, наприклад, великий андронний колайдер, радіотелескопи, спостереження за деформаціями на цих та інших унікальних спорудах, спостереження за неотектонічними процесами на геодинамічних та техногенних полігонах вимагає відносної точності вимірів $1 \cdot 10^{-6}$ і вище [Боровий, Бурачек 2017], особливі умови до висотного забезпечення високошвидкісних залізничних магістралей тощо. В плани Європейської організації з ядерних досліджень включена побудова нового колайдера в 4 рази більшого і в 10 раз потужнішого за існуючий. Ще більш потужний планує до 2030 р. збудувати Китай. Однією з обов'язкових умов для реалізації цих проектів є збільшення точності геодезичних робіт як при монтажі, так і експлуатації. Вже зараз тільки астрономо-геометричне нівелювання забезпечує висотну основу для будівництва сучасних прискорювачів, залізничних тунелів, наприклад, при будівництві 57-ми кілометрового тунелю через гірський масив

Сен-Готард С. [Hirt, et al., 2006; Hirt & Bürki, 2006] Розміри промайданчиків сучасних унікальних споруд можуть бути в границях навіть до 100 км і більше (наприклад, новий електронний колайдер), геодинамічні – до 30–50 км і техногенні полігони (термін вперше запропонований проф. А. Л. Островським [Островський, 1978]) – 5–15 км, (наприклад, на каскадах ГЕС, атомних електростанціях).



Рис. 1. Leica AT

Найсучасніший електронний тахеометр Leica Absolute Tracer AT 960 (рис. 1) забезпечує граничну похибку вимірів віддалей 0,5 мкм/м і визначення просторових координат ± 15 мкм ± 6 мкм, що відповідає точності 10^{-7} [leica-absolute-tracker-t960 (2020)]. Досягнення такої точності неможливе при проектуванні результатів вимірів на референц-еліпсоїд методом розгорткування і вимагає врахування неоднорідностей гравітаційного поля, з якими пов'язані відхилення прямовисних ліній на промайданчику, за якими відбувається орієнтування геодезичних приладів, навіть таких сучасних, як Leica Absolute Tracer AT 960.

Сучасні Глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС) разом зі спостереженнями за гравітаційним полем Землі (ГПЗ) дозволяють визначати планові зміни координат відносно центру мас Землі з точністю – 1–2 см, а відносні зміни координат сусідніх точок спостережень – з міліметровою точністю. Точність встановлення загально земної геоцентричної системи координат порядку 1 мм, стабільність пунктів порядку 0,1 мм. [Minster, Wyssession, et al., 2010; Plag & Pearlman, 2009], міліметрову точність в режимі пост опрацювання на території України офіційно гарантує мережа System Solution

[<https://systemnet.com.ua> (2019)]. Це забезпечує відносну точність при віддальх від 10 до 100 км (метод RTK-RTN) $1 \times 10^{-6} \div 1 \times 10^{-7}$ і вище при роботі навіть в стандартних режимах RTK-RTN. За віддалей менше 10 км при виконанні статичних вимірів з використанням спеціальних методик [Третяк, Сідоров, 2012] максимально досяжна точність, можливо, обмежується точністю фазометрів, які використовуються в сучасних ГНСС-приймачах – 1 %, що, при використуванні у наш час довжинах хвиль, відповідає ± 2 мм. Відповідно, відносна точність за віддалей від 1 км – не нижче 2×10^{-6} . Для досягнення максимально можливої точності при зрівнюванні таких мереж також необхідно враховувати ГПЗ Землі. Враховуючи, що в загальному ГПЗ міняється дуже повільно, навіть у історичному вимірі, для розв'язку редуційних задач можна вважати його постійним і використати одержані результати з його вивчення для аналізу вимірів минулих років, які в багатьох випадках (наприклад, в геодинамічних дослідженнях) і представляють велику, якщо не найбільшу цінність. Проте, навіть теоретично, це не завжди вірно. Наприклад, будівництво гідротехнічних споруд супроводжується змінами ГПЗ, які за результатами безпосередніх вимірів супроводжуються змінами астрономо-геодезичних відхилень виска до 1,5" [Карлсон, 1964], за мінімальної бажаної точності врахування цих змін хоча б 0,5". І взагалі, аналіз вимірів минулих років при аналізі динаміки неотектонічних процесів вимагає врахування ГПЗ при редуціюванні вимірів.

Сучасні наукові теорії [Захаров, 2003; Карпенко, 2007, 2011] пов'язують можливі катастрофічні деформації земної поверхні (зокрема землетруси), насамперед, зі змінами форми еквіпотенціальних поверхонь. Такі роботи, правда, тільки в теоретичному плані, ведуться і в Україні. [Карпенко, 2011]. В зв'язку з цим доречно буде також згадати гіпотезу, згідно якої закон всесвітнього тяжіння, який в першому приближенні для сферичної Землі сформулював геніальний І. Ньютон, для еліпсоїдальної Землі пов'язують не з віддалю до центра мас Землі, як Ньютон, а саме з кривизною (радіусами) еквіпотенціальних поверхонь. Зокрема стверджується, що поверхня світового океану не є еквіпотенціальною, найближчими до еквіпотенціальних є поверхні Землі, які співпадають з 45° широти [Захаров, 2003; Карпенко, 2007]. В зв'язку із цим зрозуміла не-

обхідність і значення спостережень за часовими змінами відхилень прямовисних ліній на стаціонарних станціях за допомогою приладів типу НСО-2 [Островський, 1978] чи сучасних електронних рівнів [Петров, 2018]. Ці прилади дозволяють в реальному часі фіксувати на електронні носії зміни в відхиленні прямовисної лінії на пункті спостереження в залежності від типу приладу з точністю від 1" до 0,05".



Рис. 2. Система DZCS

Побудова профілів еквіпотенціальних поверхонь і вивчення зміни їх кривизни було можливе вже традиційними астрономо-геодезичними методами, які розвивались як частина задачі визначення форми і розмірів фігури Землі. Маються на увазі астрономічне і високоточне геометричне нівелювання для визначення геометричних і ортометричних висот (висот точок земної поверхні відносно загально-земного геоцентричного референц-еліпсоїда або геоїда). Сучасне ж астрономічне нівелювання в даний час, як ми вже відзначали, дозволяє незалежно, з використанням зеніт приладів [Hirt, et al., 2006], визначити геоїдальну складову геометричних висот – висоту геоїда відносно референц-еліпсоїда навіть з міліметровою точністю. Для порівняння астрономо-гравіметричний метод дозволяє визначати геоїдальну складову (відносно квазігеоїда) з точністю порядку дециметра [Двуліт, Голубінка, 2009; Czarnecki, 2010], що в більшості випадків не задовольняє вимоги навіть гідрографічних, а тим більше – інженерно-геодезичних робіт.

До початку ери ГНСС використання астрономо-геодезичного методу визначення форми і

фігури Землі було значно обмежене тим, що його можна було використовувати тільки на триангуляційних пунктах I-го класу, практично тільки на пунктах Лапласа. Використання ГНСС повністю знімає першу проблему, яка виникає при застосуванні астрономо-геодезичного методу – необхідність визначення B і L з потрібною точністю. Точність визначення геодезичних координат з ГНСС-вимірів може досягати в кутовій мірі навіть $0,001''$. Тому точність визначення відхилення виска астрономо-геодезичним методом в основному залежить від точності визначення астрономічних координат, особливо, широти. Точність астрономічних вимірів широти на пунктах ДГМ України $0,2''$.

Друга проблема – рідка мережа пунктів з потрібними астрономічними спостереженнями також знімається можливістю використання зеніт-приладів, інерціальних систем тощо. Вражаючи дані про точність визначення абсолютних значень відхилень прямовисної лінії цифровою зенітною камерою TZK₂-D, розробленою в університеті Ганновера, приведені в роботі [Hirt, et al., 2006]. За результатами досліджень, виконаних ще за період 2003–2005 рр., точність визначення відхилень виска $0,05$ – $0,08''$ досягається за всього 20 хвилин спостережень. В результаті виконаних досліджень одержали 23 км профіль геоїда з точністю 1 – 2 мм, при віддальх між станціями 200 – 2000 м. На відміну від традиційних зенітних камер, в DZCS (рис. 2) встановлені ПЗС-матриця і електронний рівень точності $0,05''$.

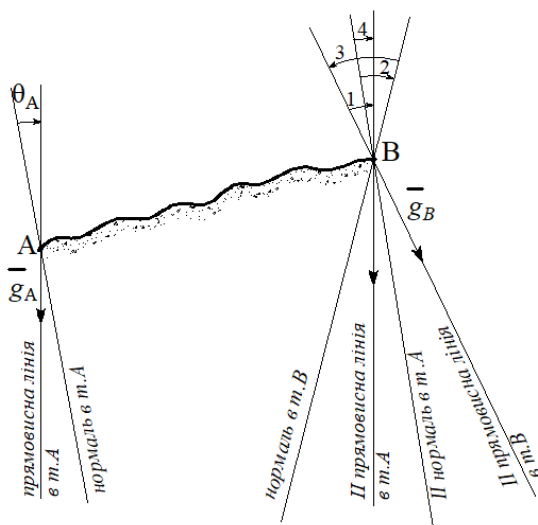


Рис. 3. Спосіб різниці відхилень

Сьогодні цифрові зенітні камери для вимірювання астрономо-геодезичних відхилень виска широко використовуються, наприклад, в країнах Прибалтики [Ansins Zarins, et al., 2016], Туреччини [Albayrak, et al., 2019], Австралії [Schack, et al., 2018].

Дуже шкода, що роботи зі створення зенітних камер із використанням ПЗС-матриці, які були розпочаті в Україні ще в минулому столітті, не знайшли свого подальшого розвитку, і більше того, навіть розуміння важливості цієї роботи. Адже в Україні ще у 2003 р., практично одночасно з зарубіжними, була розроблена, експериментально випробувана і запатентована зенітна система, яка забезпечила СКП визначення абсолютного значення астрономо-геодезичних відхилень виска на точках спостережень $\pm 0,4''$. [Боровий та ін., 2004]. Проте, одному з авторів винаходу, О. С. Гончаренку, вдалось захистити кандидатську дисертацію з астрономічно-геодезичного нівелювання тільки з другого разу, аж в 2016 р. (перший захист відбувся 2006 р.).

На перспективи використання цифрових зенітних камер (DZCS) в російськомовних джерелах ще в 2008 р. вказувалось у праці [Glazunov, 2008]. Проте, як слідує з публікації того ж автора 2017 р. [Глазунов, 2017], розвитку ці роботи на Росії, як і в Україні, не отримали.

Крім описаного способу, який дозволяє визначати на кожному пункті безпосередньо абсолютні відхилення виска і зміну висоти геоїда між пунктами, існує ще одна можливість розв'язку цієї ж задачі, а саме – шляхом визначення різниці відхилень виска на досліджуваних пунктах. В роботі [Серапинас, 2012] Б. Б. Серапинас стверджує, що розробляються і поступово впроваджуються високоточні геодезичні гравіінерційні системи, які дозволяють безпосередньо, в найкоротші терміни, виміряти зміну приростків астрономо-геодезичних відхилень виска при переміщенні від одного пункту до другого з точністю $0,1''$. В Росії ще в 2013 р. зареєстровано патент [Медовиков, Нигаматьянов, 2016], автори якого стверджують, що запатентований спосіб забезпечує точність визначення змін відхилень виска $0,1$ – $0,5''$. На жаль, в мережі відсутні дані про інші публікації про гравіінерційний метод, за винятком порівняно сучасної роботи [Старосельцев, Яшнікова, 2016], в якій приведена менш оптиміс-

тична оцінка точності гравіінерційного методу з використанням апаратури, розробленої в АТ «Концерн «ЦНИИ Электроприбор»», Санкт-Петербург, правда, для районів з сильно розчленованим (змінним) ГПЗ, які характерні для геодинамічних полігонів. Так, для околиць о. Байкал приводяться цифри $m\theta_{ср} = 1 \div 5''$. Приблизно таку ж точність визначення середніх значень астрономо-геодезичних відхилень прямовисних ліній забезпечують двосторонні синхронні вимірювання зенітних віддалей [Dvulit, et al., 2019].

Для пояснення методу визначення абсолютних відхилень виска шляхом виміру різниць відхилень між сусідніми точками ходу звернемося до рис. 3. На рис. 3 вертикальний розріз (профіль) по лінії астрономічного нівелювання з азимутом – α_{AB} . Відповідно, всі лінії на рисунку проекції прямовисної лінії і нормалі на вертикальний розріз. На рисунку т.А – точка, в якій відома ортометрична висота, її геоїдальна складова і описаними вище способами визначили проекцію абсолютного значення відхилення виска θ_{AB} . Точка В – точка, в якій визначили різницю відхилень виска між точками А і В, проекцію якої на профіль позначимо $\Delta\theta_{AB}$ (позиція 1 на рис. 3). Позиція 2 на рисунку – зближення меридіанів γ . Позиція 3 – θ_B . Позиція 4 – θ_A . Безпосередньо з рис. 3 знайдемо, що за прийнятого на рис. 3 додатнього напрямку кутів

$$\theta_B = \Delta\theta_{AB} - \theta_A + \gamma_{AB}, \quad (1)$$

де $\gamma_{AB} = ABA - AAB - 180^\circ$ – зближення меридіанів, яке, враховуючи високі вимоги до точності – бажано не менше $0,1''$, визначати з відповідних формул, наприклад [Савчук, 2000].

Звичайно, все опрацювання результатів вимірів, і на нашу думку, слід проводити в топоцентричній системі координат з строгим переходом до геоцентричних. Відзначимо, що вперше в вітчизняній літературі на це вказав ще Л. П. Пеллінен [Пеллінен, 1978], опираючись на класичну монографію [Мориц, 1979], а використали на практиці, при проведенні спостережень на техногенному полігоні Дністровської ГЕС за керівництва проф. К. Р. Третьяка [Третьак, Сідоров, 2012]. Редукування вимірів на референц-еліпсоїд також, на нашу думку, залишиться тільки для картографічних робіт. Причиною цього є той факт, що традиційні наземні опорні геодезичні мережі, уже,

можна так сказати, витіснені мережами перманентних і референціальних станцій. Спричинено це тим фактом, що ці мережі, як ми вже відзначали, забезпечують інструментальну точність методу ГНСС, уже зараз, від $1 \cdot 10^{-7}$ при віддальх порядку 100 км до $2 \cdot 10^{-7}$ при кілометрових віддальх (метод RTK-RTN). А це задовольняє за точністю в плані практично не тільки всі основні і топографічні геодезичні роботи, але й інженерно-геодезичні, виключаючи, і то тільки в випадках унікальних споруд, детальні розпланувальні і монтажні роботи. Переваги в оперативності і кошторисній вартості ГНСС робіт не викликають сумнівів. В інженерній геодезії, взагалі, при виконанні як вишукувальних, так і розпланувальних робіт вже давно користувались і користуються спеціальними інженерно-геодезичними мережами, які зрівнювались не в державних, а в умовних горизонтальних системах координат, осі яких орієнтують в системі координат генплану. Якщо таку систему прив'язати за допомогою ГНСС вимірів (мінімально один базис), то, орієнтувавши нуль лімба електронного тахеометра за цим базисом (з відомим геодезичним азимутом), можна безпосередньо за вимірами одержувати координати в топоцентричній системі, і далі, за строгими математичними формулами, перерахувати в геоцентричну загальноземну прямокутну систему координат WGS-84 і ще далі – в будь яку картографічну систему, в тому числі і УСК 2000, як це вимагається діючими в Україні нормативними документами [Burak, Lysko, 2018].

Розглянемо можливість використання результатів астрономо-геодезичного нівелювання і для контролю ГНСС нівелювання на геодинамічних полігонах. Таку можливість безпосередньо надає інтегральна формула узагальненого астрономічного нівелювання, яка є важливим складовим елементом ще теорії Молоденського [Молоденский и др., 1960]. Запишемо її в сучасній інтерпретації:

$$\Delta H_{AM}^{геом} = \Delta H_{AM}^{орт} + (N_M - N_A) = [h]_{AM} + p_{орт} - (N_M - N_A), \quad (2)$$

де $\Delta H_{AM}^{геом}$ – різниця геометричних висот (висот відносно геоцентричного еліпсоїда, які в наш час можна одержати за результатами ГНСС нівелювання); $\Delta H_{AM}^{орт}$ – різниця ортометричних висот (гіпсометрична частина, яку одержуємо

систем, що вимірюється величиною до 2 мм [Hirt, et al., 2006]. Щоб одержати ці ж результати (ортометричні висоти і висоти геоїда) за результатами традиційних геометричного і астрономічного нівелювання нам необхідно ще знати значення сили тяжіння на всіх станціях встановлення інструмента і рейок і розподіл сили тяжіння на силовій лінії ГПЗ від репера до геоїда, на кінцевому репері ходу. Що стосується першої частини задачі, то для її розв'язку з достатньою точністю на всій території України з висотами до 0,5 км, вистарчить навіть існуючих гравіметричних карт. Що стосується розподілу сили тяжіння на силовій лінії ГПЗ до геоїда, то це питання по меншій мірі ще дискусійне і якраз астрономо-геометричне нівелювання з використанням зеніт-систем, можливо, допоможе його розв'язати, особливо в передгірських і гірських районах. Тобто, якщо будуть відомі висоти геоїда, геометричні висоти з ГНСС нівелювання, то можна буде оцінити і точність ортометричних висот, одержаних, за прийнятою методикою (див. (4)).

В заключення опишемо ідею ще одного, запропонованого нами, контрольного варіанту астрономічного способу визначення різниці відхилень виска на двох пунктах з використанням зеніт систем, який спрощує як виміри, так і до мінімуму зводить попередні розрахунки та обчислення результатів на станціях ходу, підвищує точність в порівнянні з використанням інерціальних систем. У способі використовується геніальна здогадка Ератосфена Кирейського про відсутність значного паралаксу зірок навіть на віддальх рівних діаметру Землі. Допустимо, що на пункті А (перманентній станції, на якій виконуються виміри за класичним астрономо-геодезичним методом визначення абсолютного значення відхилення виска) і на поточному пункті В встановлені і приведені в робоче положення за допомогою електронного рівня з точністю 0,05" і орієнтовані за геодезичними меридіанами дві зенітні системи (рис. 4). Попередньо припустимо, що камери досліджені так, що помилками в визначенні елементів їх внутрішнього орієнтування (фокусної віддалі і координат головної точки), ми можемо нехтувати. Виконаємо на пункті А і на пункті В два одномоментні знімки.

Синхронності можна досягти за допомогою приладдя для розділення сигналу, наприклад, типу Splitter, потрібна одномоментність не нижче 0,05 сек. Взагалі, на т. А виміри можуть проводитись навіть не постійно, а з деяким інтервалом, який допускає лінійне інтерполювання результатів. Врахувавши той факт, що зірковий паралакс навіть на протязі року не перевищує 0,001" навіть на діаметрі Землі, напрямки на зірку на точках А і В незалежно від віддалі між ними і орієнтування лінії – паралельні. На рисунку О – центр об'єктива зенітної камери, O_A і O_B – головні точки відповідних знімків на точках А і В, Z^A і Z^B – зображення зірки на відповідних знімках. $O_A Z^A = x_A$ і $O_B Z^B = x_B$ – абсциси зображення зірки на відповідних знімках. Вимірявши ці абсциси, знайдемо проекцію в першому вертикалі різниці напрямків прямовисних ліній в точках А і В за однією з очевидних формул, наприклад:

$$\Delta\theta_{AB} = 90^\circ - (\arccos \left(\frac{f}{\sqrt{(f^2 + x_A^2)}} \right) + \arccos \left(\frac{x_B}{\sqrt{(f^2 + x_B^2)}} \right)). \quad (5)$$

Відповідно, за ординатами зірки на обох знімках знайдемо проекції в меридіані різниці напрямків прямовисної лінії на пунктах А і В.

Оскільки кожна зірка дає нам можливість скласти рівняння типу (5), то, можливо, замість дослідження камер (визначення елементів внутрішнього орієнтування і $f_A, x_A^0, y_A^0, f_B, x_B^0, y_B^0$), скористатись загальним видом рівняння :

$$\Delta\theta_{AB} = 90^\circ - (\arccos \left(\frac{f_A}{\sqrt{f_A^2 + (x_A^0 + x_A)^2}} \right) + \arccos \left(\frac{(x_B^0 + x_B)}{\sqrt{f_B^2 + (x_B^0 + x_B)^2}} \right)). \quad (6)$$

Тоді, результати спостережень чотирьох і більше зірок, дадуть нам можливість розв'язку задачі з контролем і оцінкою точності.

Висновки

1. Як показує аналіз літератури, астрономічне нівелювання з використанням зенітних систем і ГНСС, на даний час найбільш точний і високопродуктивний метод для визначення висот геоїда на континентальній частині.

2. Результати повторного астрономо-геометричного нівелювання сучасними методиками, спеціально створених окремих профілів на геодинамічних і техногенних полігонах, дозволять з міліметровою точністю визначати зміну форми геоїдальних поверхонь, а саме зі змінами радіуса кривизни еквіпотенціальних поверхонь пов'язують катастрофічні деформації земної поверхні, зокрема і землетруси.

3. Запропонована в статті ідея контрольного варіанту астрономічного методу визначення різниці відхилень виска з синхронних вимірів дозволить підвищити точність класичного методу, не вимагає попереднього обчислення ефемерид зірок тощо.

4. Сучасні технології дозволяють визначити геоїдальну складову геометричних (ГНСС) висот з міліметровою точністю. А це, в свою чергу, дозволяє оцінити точність визначення ортометричної поправки і, можливо, контролювати точність визначення перевищень в ходах геометричного нівелювання, наприклад, навіть II-го класу за їх довжини вже більше 5 км і навпаки – контролювати точність ГНСС-вимірів висот за менших віддалей при розвитку висотної основи на геодинамічних і технологічних полігонах, які створюються для будівництва та експлуатації унікальних об'єктів, відповідно вдосконалити методику побудови цих полігонів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Боровий В. О., Бурачек В. Г. *Високоточні інженерно-геодезичні вимірювання*: навчальний підручник. ТОВ "Нілан-ЛТД", 2017. 236 с.
- Боровий В. О., Бурачек В. Г., Гончаренко О. С., Карпінський Ю. О. Деклараційний патент на винахід 63575 А України # 2003054111. Заявлено 06.05.2003. Опубл. 15.01.2004. Бюл. 1.
- Глазунов, А. С. Состояние и перспективы развития геодезической астрономии в РФ. 2017.
- Дзуліт П. Д., Ю. І. Голубінка. Порівняльна характеристика визначення висот квазігеоїда території України з використанням моделей геоїда/квазігеоїда та гравітаційного поля Землі. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2009, Вип. 72. С. 27–34.
- Захаров В. Д. Тяготение. От Аристотеля до Эйнштейна. Москва: БИНОМ, 2003. 278 с.
- Івашенко М. В. Оцінка швидкостей за даними ГНСС спостережень В Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України для подальших геодинамічних досліджень. *Вісник астрономічної школи*, 2017. Том 13. С. 48–53.
- Карлсон А. А. Измерение деформаций инженерных сооружений. М. Недра, 1964.
- Карпенко І. В. Фізичні основи тектоніки глобальних катастроф. *Зб. наук. праць Укр. держ. геолого-розвід. ін-ту*. Київ: Укр. держ. геолого-розвід. ін-т, 2007. № 3. С. 74–82.
- Карпенко І. В. Гравитационный потенциал: определение и измерение в точках поверхности не-сферического неоднородного тела. *Геофизический журнал*, 2011. № 4. Т. 33.
- Краснорылов И. И., Львов В. Г., Сафонов Г. Д. Об астрономических определениях в АГС СССР и задачах геодезической астрономии. *Геодезия и картография*. 1995. № 8. С. 22–27.
- Медовиков А. С., Нигаматьянов Р. М. патент, 2016 <https://findpatent.ru/patent/176/1760313.html>.
- Молоденский М. С., Еремеев В. Ф., Юркина М. И. Методы изучения внешнего гравитационного поля и фигуры Земли. *Труды ЦНИИГАиК*, 1960. Вып. 131. 251 с.
- Мориц Г. *Современная физическая геодезия*, М.: „Недра“, 1979. 200 с.
- Островский А. Е. *Деформации земной коры по наблюдениям наклонов*. М. Наука, 1978, 184 с.
- Островский А. Л., Бурак К. О., Заблоцкий Ф. Д., Черняга П. Г., Третьяк К. Р.; під. ред. А. Л. Островського. *Методичний посібник з організації комплексних досліджень на геодинамічних полігонах України. Розділ 5. Геодезичний моніторинг*. Колективна монографія. Львів, 1998. 58 с.
- Пеллинен Л. П. *Высшая геодезия (Теоретическая геодезия)*. М., Недра, 1978. 264 с.
- Петров С. Л. *Мониторинг вертикальных смещений техногенно навантажених територій геодезичними методами*. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 «Геодезія, фотограмметрія та картографія». Національний університет «Львівська політехніка», Міністерства освіти і науки України. Львів, 2018.
- Савчук С. Г. *Вища геодезія (Сфероїдична геодезія)*: підруч. Львів: Ліга-Прес, 2000. 248 с.
- Серапинас Б. Б. *Геодезические основы карт. Гравитационное поле. Высоты* Лекция 7. 2002. http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/docs/GOK/gok_lecture_7.pdf.
- Старосельцев Л. П. & Яшникова О. М. (2016). Оценка погрешностей определения параметров сильно аномального гравитационного поля Земли.

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 16(3).

- Третяк К., Сидоров І. Сумісне опрацювання супутникових і наземних геодезичних вимірів високоточної мережі будівництва Дністровської ГАЕС. *Вісник геодезії та картографії*, 2012, № 3 (78). С. 6–9
- Albayrak M., Hirt C., Guillaume S., Özlüdemir M. T., Halicioğlu K. & Başoğlu B. (2019). New astrogeodetic observations of vertical deflections at the Istanbul astrogeodetic network demonstrate issues in global gravity models along coastlines. *27th IUGG General Assembly*.
- Burak K., Lysko B. Implementation of alternative algorithms for defining the transformation parameters of USK=2000 and coordinate systems of general layout during the marking operations. *Archives of institute of civil engineering*. 2018. N27. Poznań ISSN 1897–4007.
- Darren Kerr (2015). Height Modernization from Static GPS Networks in Oregon: Evaluating NGS Guidelines and OPUS-Projects.
- Dvulit P., Dvulit Z. & Sidorov I. (2019). Determination of plumb lines with using trigonometric leveling and GNSS measurements. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*, 89, 12–19.
- Cacoń S., Bosy J. & Kontny B. (1999). The GPS leveling network in the conurbation of Wrocław. *Artificial Satellites*, 34(3), 163–170.
- Glazunov A. S. (2008, April). Modern trends in geodetic astronomy. In *GEO-SIBIR'-2008, Sb. materialov IV Mezhdunar. nauch. kongressa (GEO-SIBIR'-2008, Proc. IV Int. Scientific Congress)* (Pp. 183–188).
- Czarnecki K. *Geodezja wspolczesna*. Katowice, Wydawnictwo Gall, 2010. 487 p.
- Hirt C., Bürki B. (2006). Status of Geodetic Astronomy at the Beginning of the 21st Century [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ife.uni-hannover.de/mitarbeiter/seeber/seeber_65/pdf_65/hirt8.pdf.
- Hirt C., Seeber G., Bürki B., Müller A. (2006). *Die digitalen Zenitkamera systeme TZK2-D und DIADEM zur hochpräzisen Geoidbestimmung* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mplusm.at/ifg/download/hirt-05.pdf>.
- Leica-absolute-tracker-t960-canner-(2020). <https://www.hexagonmi.com/products/laser-tracker-systems/bundle30>.
- Minster J. B., Wyssession M. E. et al. (2010) *Precise Geodetic Infrastructure. National Requirements for a Shared Resource*. The National academies press. P. 142.
- Plag H. P., Rothacher M., Pearlman M., Neilan R. & Ma C. (2009). The global geodetic observing system. In *Advances in Geosciences: Volume 13: Solid Earth (SE)* (Pp. 105–127).
- Schack P., Hirt C., Hauk M., Featherstone W. E., Lyon T. J. & Guillaume S. (2018). A high-precision digital astrogeodetic traverse in an area of steep geoid gradients close to the coast of Perth, Western Australia. *Journal of Geodesy*, 92(10), 1143–1153.
- System Solution. <https://systemnet.com.ua> (2019).
- Zariņš A., Rubans A. & Silabriedis G. (2016). Digital zenith camera of the University of Latvia. *Geodesy and Cartography*, 42(4), 129–135.

Kostyantyn O. BURAK¹, Kostiantyn YAROSH²

¹ Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15, Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine, e-mail: burak4111945@gmail.com.

² Odessa National Polytechnic University, 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine, e-mail: yaroshkonst@gmail.com.

ON PROSPECTS OF ASTRONOMO-GEODESIC LEVELING FOR COORDINATE SUPPORT OF GEODYNAMIC AND TECHNOGENIC POLYGONS

The purpose of this work is to show the prospects and the need to continue work in Ukraine on the creation of anti-aircraft systems and astronomical geodetic leveling (a combination of astronomical and high-precision geometric leveling), using GNSS and instruments that provide accurate measurements of deviations of the temple 0.1 geodynamic landfills and man-made, which create for the construction of a height foundation for the construction and operation of extremely important facilities. The method of achieving the goal is provided by theoretical studies of existing methods of astronomical and geodetic leveling, modern methods of forecasting neotectonic processes, GNSS accuracy and geometric leveling. The main results - the possibility of using astronomical and geodetic leveling in the forecast of catastrophic deformations of the earth's surface, including earthquakes, control of the results of geometric and GNSS leveling. Scientific novelty: recommendations for the use of astronomical and geodetic leveling of specially created profiles on geodynamic landfills for forecasting neotectonic processes, GNSS control and geometric leveling using the geoidal component, the idea of synchronous observations using zenith systems in astronomical and geodetic leveling.

Key words: deviation of steep lines; zenith systems; GNSS; geodetic and orthometric heights; astronomical leveling.

Надійшла 16.03.2021 р.