

Лиско Богдан Олегович,
кандидат технічних наук, доцент кафедри
геодезії та землеустрою,
Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу

Bohdan Lysko,
Candidate of Technical Sciences,
Ivano-Frankivsk National
Technical University of Oil and Gas
<https://orcid.org/0000-0002-2525-1557>

**ПЕРСПЕКТИВИ КОМПЛЕКСНОГО ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОТОЧНОГО ГЕОМЕТРИЧНОГО
ТА GNSS НІВЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ НЕОТЕКТОНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА
ГЕОДИНАМІЧНИХ ПОЛІГОНАХ**

**THE PROSPECTS OF INTEGRATED USE OF HIGH-PRECISION GEOMETRIC AND GNSS
LEVELING FOR STUDYING NEOTECTONIC PROCESSES AT GEODYNAMIC POLYGONS**

Лиско Б. О. Перспективи комплексного
використання високоточного геометричного
та GNSS нівелювання для вивчення неотекто-
нічних процесів на геодинамічних полігонах.
*Український журнал прикладної економіки та
техніки*. 2023. Том 8. № 1. С. 180 – 186.

Lysko B. The prospects of integrated use of
high-precision geometric and GNSS leveling
for studying neotectonic processes at
geodynamic polygons. *Ukrainian Journal
of Applied Economics and Technology*.
2023. Volume 8. № 1, pp. 180 – 186.

Стаття присвячена розробці методики визначення відхилення прямовисних ліній з використанням високоточного нівелювання та GNSS вимірювань, розрахунковій оцінці точності вказаної методики та обґрунтуванню технологічних параметрів для побудови геодинамічних полігонів. Зміна форми еквіпотенціальної поверхні вказує на перерозподіл маси у земній корі та інші природні явища, тому вказана проблема є важливою у геодезичній та геофізичній галузях. У статті проаналізовано існуючі методи визначення зміни форми еквіпотенціальної поверхні та обґрунтовано переваги використання високоточного нівелювання та GNSS вимірювань для забезпечення точності та достовірності результатів. Запропоновано розрахункові формули оцінки точності визначення відхилення прямовисних ліній з можливістю дослідження форми еквіпотенціальних поверхонь із міліметровою точністю. Розроблено методику та обґрунтовано технологічні параметри, дотримуючись яких можна визначити зміну відхилення прямовисної лінії на геодинамічних полігонах з точністю 0,1-0,2". Також теоретично обґрунтовано можливість використання результатів досліджень для визначення змін у формі еквіпотенціальних поверхонь, що згідно із сучасними науковими гіпотезами дозволить прогнозувати неотектонічні процеси.

Ключові слова: відхилення прямовисних ліній; глобальні навігаційні супутникові системи; геометричне нівелювання; ортометричні перевищення; геоїд, геодезичні висоти.

This article presents the development of a methodology for determining the deviation of straight lines using high-precision leveling and GNSS measurements, its estimated accuracy, and the justification of technological parameters for constructing geodynamic testing grounds. This problem is essential in the geodetic and geophysical fields since changes in the shape of the equipotential surface may indicate a redistribution of mass in the Earth's crust and other natural phenomena. Studying this problem using the proposed methodology can provide insight into the main geological processes, gravitational potentials, and neotectonic processes. Monitoring of changes and deformation of the Earth's surface is of great importance for understanding solid processes on the Earth, especially those caused or intensified by anthropogenic activities, which currently pose global challenges to humanity. The study presents the analysis of the existing methods for determining the change in the shape of the equipotential surface. It substantiates the advantages of using high-precision leveling and GNSS measurements to ensure the accuracy and reliability of the results. The calculation formulas for estimating the accuracy of determining the deviation of straight lines with the possibility of studying the shape of equipotential surfaces with millimeter accuracy are proposed. The methodology and technological parameters have been developed, which can be used to determine the change in the deviation of a straight line on geodynamic polygons with an accuracy of 0.1-0.2". Also, the possibility of using the research results to determine changes in the shape of equipotential surfaces is theoretically substantiated. Namely, changes in their radii of curvature are associated with the possibility of predicting neotectonic processes according to modern scientific hypotheses.

Keywords: deviation of straight lines; global navigation satellite systems; geometric leveling; orthometric excesses; geoid, geodetic heights.

Вступ

Незважаючи на стрімкий розвиток технологій та значний науковий прогрес прогнозування землетрусів все ще залишається складною і комплексною проблемою, дослідження і розробки в цій галузі можуть допомогти зменшити вплив землетрусів на суспільство і поглибити наше розуміння будови і динаміки руху земної поверхні.

Як відомо, під час землетрусу, відбувається рух тектонічних плит, що приводить до перерозподілу маси в земній корі та супроводжується змінами у формі еквіпотенціальної

поверхні (геоїда). Такі деформації земної поверхні спричинені різноманітними факторами, включаючи тектонічну активність, просідання внаслідок виведення рідин з надр, вулканічна активність тощо. Ці процеси супроводжуються змінами в розподілі маси Землі, що у свою чергу, може спричинити зміни гравітаційного потенціалу та форми еквіпотенціальної поверхні. Таким чином? вимірюючи зміни у формі еквіпотенціальної поверхні, отримуємо не тільки уявлення про основні геологічні процеси, гравітаційні потенціали, але і можливість короткочасного прогнозування деформацій земної поверхні. Наприклад, якщо певна територія зазнає підняття або опускання, це спричиняє зміни гравітаційного потенціалу та напряму сили тяжіння. Спостерігаючи за цими змінами, можна отримати уявлення про природу, ступінь деформації і передбачити, як вона буде розвиватися з часом.

На даний час перспективним напрямом є дослідження відхилення прямовисних ліній. Воно має тісний зв'язок із формою еквіпотенціальної поверхні або геоїда, оскільки геоїд має однаковий гравітаційний потенціал у всіх точках своєї поверхні, а напрям сили тяжіння перпендикулярний до неї. Тому форма геоїда або еквіпотенціальної поверхні впливає на напрям сили тяжіння, що у свою чергу, впливає на відхилення прямовисної лінії. Вимірюючи відхилення прямовисної лінії в різних місцях, можна судити про особливості форми геоїда або еквіпотенціальної поверхні, які дають цінну інформацію про деформації земної поверхні та динаміку руху земної поверхні в цілому.

З розвитком GNSS-технологій зростає точність визначення координат точок спостережень та вимірів геодезичних перевищень, що дало можливість розробити методику визначення відхилень прямовисних ліній із використанням високоточного нівелювання та GNSS-спостережень.

Моніторинг змін і деформації земної поверхні має велике значення для розуміння твердих процесів на Землі, особливо тих, які спричинені або посилюються антропогенною діяльністю та наразі представляють глобальні виклики [1, 2]. Тому першочергове завдання для вивчення неотектонічних процесів полягає в створенні мережі регіональних геодинамічних полігонів та розробленні методики [8, 9], що забезпечують точність вимірів відхилень виска 0,1–0,2" або зміну форми еквіпотенціальної поверхні з точністю кількох міліметрів.

Космічні методи визначення змін еквіпотенціальної поверхні ґрунтуються на використанні методів дистанційного зондування для вимірювань гравітаційного поля Землі. До цих методів належать супутникова альтиметрія, супутникова гравіметрія та супутникове лазерне визначення дальності (satellite laser ranging). Серед наведених методів вимірювань особливої уваги заслуговують методи двопрохідного та багаточасового інтерферометричного радара з синтетичною апертурою (InSAR) [3, 4]. Результати роботи даних методів зараз частково у вільному доступі [5] та все частіше використовуються для наукових досліджень і для виконання оперативних завдань, таких як моніторинг і картографічні послуги континентального масштабу [6, 7]. Космічні методи можуть забезпечити глобальні вимірювання гравітаційного поля Землі, які можна використовувати для великомасштабного моніторингу змін еквіпотенціальної поверхні.

Наземні методи полягають у вимірюванні відхилення прямовисної лінії або зміни сили гравітаційного поля Землі безпосередньо на фізичній поверхні землі. Наземні методи визначення змін еквіпотенціальної поверхні пропонують вищу точність, кращу роздільну здатність, нижчу вартість, простіше обслуговування і незалежність від погодних умов порівняно з космічними методами. А вплив атмосферних та інструментальних похибок завдяки розробленим науково-обґрунтованим та апробованим методикам є мінімальним. Це робить наземні методи визначення змін еквіпотенціальної поверхні більш надійними та придатними для можливості прогнозування деформацій земної поверхні шляхом визначення локальних змін еквіпотенціальної поверхні.

Наземні гравітаційні вимірювання передбачають використання таких приладів, як гравіметри, для вимірювання сили гравітаційного поля на фізичній поверхні Землі. Вимірюючи зміни напруженості гравітаційного поля в часі, можна створювати карти гравітаційного поля Землі і на їх основі визначати зміни форми еквіпотенціальної поверхні. Вони дозволяють забезпечити високу точність і використовуються для локального і регіонального моніторингу змін у гравітаційному полі Землі [9, 10]. При вимірюванні наземними гравітаційними методами відсутній вплив атмосферних перешкод та похибок позиціонування. Недоліком таких вимірювань є низька оперативність (тривалість вимірювань можуть становити кілька десятків годин для однієї точки). Наземні гравіметричні вимірювання є чутливими до місцевих особливостей рельєфу, оскільки вимірювання проводять не на поверхні геоїда, а на фізичній

поверхні землі. Якщо зміни маси відбуваються над поверхнею геоїда, наприклад, через зміну маси гірських порід або водних об'єктів, то на форму геоїда це не вплине, оскільки ці маси не входять у визначення геоїда. Однак зміни маси все одно спричинять зміни гравітаційного потенціалу на фізичній поверхні Землі. Наземні методи гравіметрії, такі як метод абсолютної гравітації та метод відносної гравітації, безпосередньо вимірюють гравітаційний потенціал і тому є більш чутливими до змін у розподілі маси над поверхнею геоїда, а наявність похибок у виміряних даних ускладнює подальший аналіз результатів вимірювань. Однак, ці методи все ще можуть бути корисними в поєднанні з іншими геодезичними методами для точного визначення змін у геоїді.

У цій ситуації для визначення змін форми геоїда разом із наземними гравітаційними вимірюваннями можна використовувати методи, на які не впливають зміни мас над поверхнею геоїда. Методи, такі як астрономогеодезичне нівелювання, геометричне нівелювання та нівелювання GNSS [8, 12, 13], базуються на визначенні напрямку або вектора сили тяжіння, а не на абсолютному значенні гравітаційного потенціалу. Вимірюючи зміни в напрямі сили тяжіння, можна зробити висновок про зміни в розподілі маси, які впливають на гравітаційне поле, не будучи чутливими до абсолютного значення гравітаційного потенціалу.

Формулювання цілей статті

Метою статті є теоретичне обґрунтування можливості визначення відхилення прямовисних ліній з використанням високоточного нівелювання та GNSS вимірювань, оцінка точності запропонованої методики та обґрунтування технологічних параметрів для побудови геодинамічних полігонів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Проаналізувавши методи наземного та космічного моніторингу змін форми еквіпотенціальної земної поверхні, запропоновано комплексний підхід до визначення відхилення прямовисної лінії. Він полягає у знайденні різниці між зенітною віддаллю Z^{GNSS} обчисленою за даними GNSS-спостережень, та зенітною віддаллю Z^{ort} , обчисленою за геодезичними спостереженнями, приведеними до поверхні геоїда (див. рис. 1).

$$\varepsilon = Z^{GNSS} - Z^{ort} \quad (1)$$

Для пояснення методу визначення відхилення прямовисної лінії шляхом виміру різниці висот між сусідніми точками ходу звернемося до рис. 1. На рис. 1 вертикальний розріз (профіль) по лінії геометричного нівелювання II класу із азимутом α_{AB} . Відповідно, всі лінії на рисунку проєкції прямовисної лінії і нормалі на вертикальний розріз (площина прямого нормального перерізу), що включає нормалі до еліпсоїда в точці A та точці B і спроектовану нормаль, опущену з точки B у точку A. За допомогою GNSS-спостережень визначаються геодезичні висоти точок A та B.

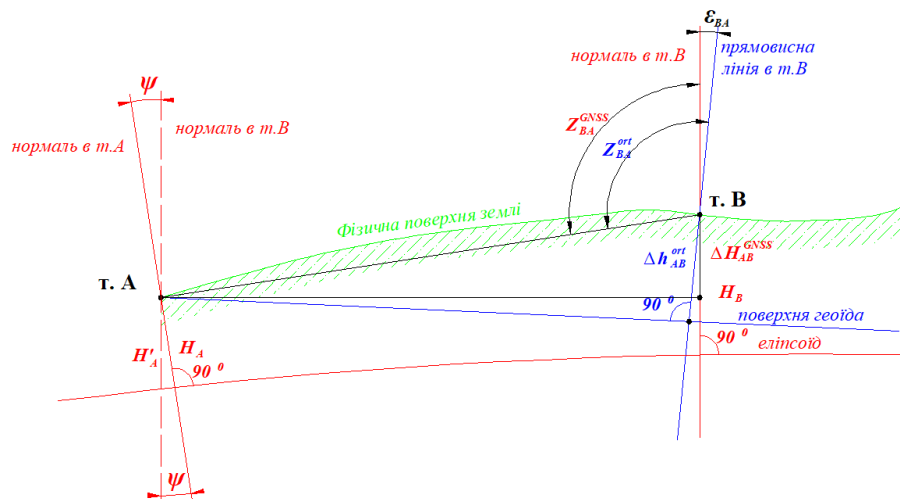


Рис. 1. Визначення відхилення прямовисної лінії за зенітними віддальми

Для визначення зенітних віддалей Z^{GNSS} та Z^{ort} необхідно знайти перевищення між двома точками відносно еквіпотенціальної поверхні та поверхні еліпсоїда, а також геодезичні координати пунктів спостереження.

Спираючись на рисунок 1, формули матимуть вигляд:

$$\begin{aligned}
Z_{AB}^{GNSS} &= \arccos \frac{\Delta H_{AB}^{GNSS}}{S_{AB}} \\
Z_{BA}^{GNSS} &= 180 - \arccos \frac{\Delta H_{BA}^{GNSS}}{S_{AB}} \\
Z_{AB}^{ort} &= \arccos \frac{\Delta h_{AB}^{ort}}{S_{AB}} \\
Z_{BA}^{ort} &= 180 - \arccos \frac{\Delta h_{BA}^{ort}}{S_{AB}}
\end{aligned}
\tag{2}$$

Оскільки нормаль в $m.B$ і нормаль в $m.A$ є не паралельними, спроектуємо нормаль, опущену з точки B у точку A , тоді для визначення перевищень за геодезичними висотами точок формула набуде вигляду:

$$\Delta H_{AB}^{GNSS} = H_B - \frac{H_A}{\sin \psi} \tag{3}$$

Різницю ортометричних висот можна обчислити за формулою:

$$\Delta h_{AB}^{ort} = [h]_{AB} + \rho_{AB}^{ort} \tag{4}$$

де $[h]$ - сума перевищення між точками A та B , виміряне під час геометричного нівелювання, ρ^{ort} - ортометрична поправка, яка враховує відхилення геоїда від еліпсоїда та інші фактори, які впливають на висоту точки над рівнем моря.

За допомогою GNSS-вимірів одержимо геодезичні координати точок A і B , за якими знайдемо різницю геодезичних висот ΔH_{AB}^{GNSS} та віддалі між ними S_{AB} :

$$\Delta H_{AB}^{GNSS} = H_B^{GNSS} - H_A^{GNSS} \tag{5}$$

Порівнявши зенітні віддалі, отримані за допомогою GNSS-вимірювань (5) із зенітними віддальми, розрахованими на основі даних геометричного нівелювання (4), отримаємо кут відхилення прямовисних ліній:

$$\varepsilon_{AB} = \arccos \frac{\Delta H_{AB}^{GNSS}}{S_{AB}} - \arccos \frac{\Delta h_{AB}^{ort}}{S_{AB}} \tag{6}$$

Еліпсоїдні та ортометричні перевищення будемо вважати некорельованими, тоді СКП функції буде дорівнювати сумі квадратів знайдених часткових похідних по кожній змінній, помножений на їх середні квадратичні похибки:

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{S_{AB}^2} (\sigma_{\Delta H}^2 + \sigma_{\Delta h}^2) + \left(\frac{\Delta H_{AB}^{GNSS} - \Delta h_{AB}^{ort}}{S_{AB}^2} \right)^2 \sigma_{\Delta S}^2 \tag{7}$$

Другий член у формулі (7) є порівняно із першим малим і не впливатиме на загальне значення точності визначення відхилення прямовисної лінії, тому ним можна знехтувати. Отже, формулу можна записати так:

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{S_{AB}^2} (\sigma_{\Delta H}^2 + \sigma_{\Delta h}^2) \tag{8}$$

де Δh - точність визначення ортометричних перевищень; ΔH - точність визначення еліпсоїдних перевищень.

Проаналізувавши формулу (8) можна стверджувати, що розрахункова точність визначення відхилення прямовисної лінії (σ_ε^2) буде прямо пропорційна квадратам похибок визначення ортометричних ΔH та еліпсоїдних Δh перевищень і обернено пропорційна квадрату віддалі між пунктами A і B .

На даний час оптимальними для визначення геодезичних висот є методи, що базуються на використанні глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS). В залежності від принципу дії всі GNSS методи можна поділити на кінематичні та статичні. Дані методи та їх конфігурації характеризуються своїми перевагами та недоліками, які описані у роботах українських та закордонних науковців і характеризуються різною точністю одержання результатів, яка коливається від міліметрів до дециметрів.

Для прикладу представимо точність визначення ортометричних перевищень як середню квадратичну похибку геометричного нівелювання $\sigma_{\Delta h}^2$

$$\sigma_{\Delta h}^2 = n^2 \cdot S_{AB} + m^2 \cdot S_{AB}^2, \tag{9}$$

де n - випадкова похибка; m - систематична похибка; S - довжина ходу в кілометрах.

Таким чином, підставивши залежність (8) у формулу (9) отримаємо:

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{S_{AB}^2} (\sigma_{\Delta H}^2 + n^2 \cdot S_{AB} + m^2 \cdot S_{AB}^2) \tag{10}$$

Розраховану точність визначення відхилення прямовисної лінії σ_ε^2 (9) можна відобразити у вигляді площинної номограми (рис. 2). Для нівелювання II класу $n = 2$ мм, $\sigma = 0.2$ мм. Вказана номограма середньої квадратичної похибки визначення відхилення прямовисної лінії σ_ε^2 від віддалі між пунктами та точністю визначення геодезичних висот (див. рис. 2). По осі абсцис

відкладено значення віддалі S_{AB} між пунктами на фізичні поверхні Землі в кілометрах, а по осі ординат – середню квадратичну похибку $\sigma_{\Delta H}^2$ визначення геодезичних перевищень в міліметрах.

Зазвичай точність визначення геодезичних перевищень, яку можна одержати,

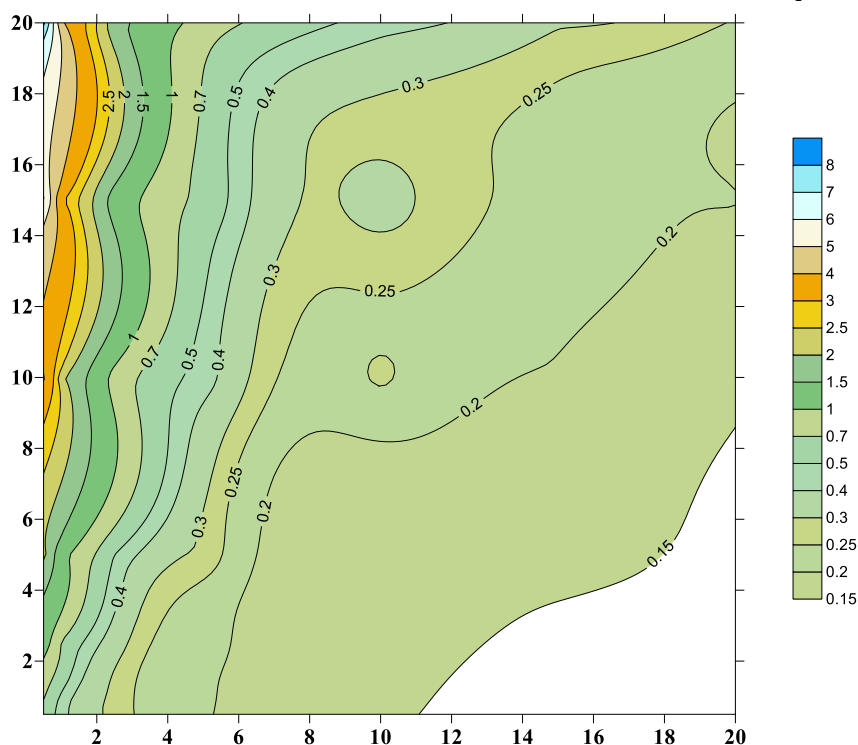


Рис. 2. Номограма розрахунку середньої квадратичної похибки $\sigma_{\Delta H}^2$ у залежності від віддалі між пунктами та точністю визначення геодезичних висот

використовуючи двохчастотний GNSS, приймач може змінюватися від кількох міліметрів до дециметра. Дослідженням у даному напрямку присвячено достатньо публікацій. Автори розглядають вплив на вимірювання наступних факторів: тип приймача, умови спостереження, час спостереження, вплив атмосферних ефектів, наявність сигналів від достатньої кількості супутників та використовуваних алгоритмів обробки даних. Тому точність GNSS нівелювання може відрізнитися в залежності від конкретної ситуації та умов вимірювань. Однак у роботах [14, 15] авторам вдалося забезпечити точність визначення еліпсоїдних

перевищень на рівні 2 мм. Дану точність вдалось забезпечити завдяки диференційованій обробці GAMIT/GLOBK одержаних даних. Обробка даних GNSS полягала у використанні точних супутникових орбіт [16], параметрів орієнтації Землі, поправок годинника приймача та супутника, моделей варіації абсолютного фазового центру для приймача та супутникових антен [17, 18, 19], приливних навантажень океану та Землі, і поправки на атмосферні впливи [20, 21].

СКП відхилення прямовисної лінії, наведені в таблиці 1, розраховано за формулою (10). Наприклад, при СКП визначення геодезичних перевищень $\sigma_{\Delta H}^2=2,5$ мм, яку можна забезпечити завдяки диференційованій обробці GAMIT/GLOBK одержаних даних та використанню сучасних GNSS приймачів типу LEICA VIVA GS16, при довжині базису, наприклад, 1 км теоретично можна забезпечити визначення відхилення прямовисної лінії σ_{ϵ}^2 на рівні $\pm 0,67''$.

Таблиця 1. Теоретичні значення точності обчислення відхилення прямовисної лінії

Значення	$S=0,5$ км	$S=1$ км	$S=2,5$ км	$S=5$ км	$S=10$ км	$S=15$ км	$S=20$ км
$\sigma_{\Delta H}=\pm 2,5$ мм	$\pm 1,19''$	$\pm 0,67''$	$\pm 0,35''$	$\pm 0,23''$	$\pm 0,17''$	$\pm 0,15''$	$\pm 0,13''$

При більших довжинах ліній точність визначення відхилення прямовисної лінії буде пропорційно зростати. Аналіз рис. 2 показує, що у випадку створення геотехногенних полігонів із довжиною базисів більше 10 км, запропонована методика визначення відхилень прямовисних ліній забезпечує точність 0,1–0,2". Це дозволить 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. Отже, на основі моніторингу та обробки даних за запропонованою методикою можна прогнозувати геодинамічні процеси в земній корі.

Висновки та перспективи подальших розвідок

Проведений аналіз існуючих методів визначення зміни форм еквіпотенціальної поверхні. Обґрунтовано, що для забезпечення високої точності та достовірності результатів перспективним напрямом є використання високоточного нівелювання та GNSS-вимірювань.

Розраховано, що для забезпечення достатньої точності визначення відхилень прямовисних ліній необхідно між пунктами геодинамічного полігону провести серію вимірювань геометричного нівелювання II класу із врахуванням ортометричної поправки.

Запропонована методика та розрахункові формули оцінки точності визначення відхилень прямовисних ліній за допомогою комплексних вимірювань різниці геодезичних висот (GNSS-методами) та ортометричних висот (високоточне геометричне нівелювання із врахування ортометричної поправки) на пунктах геодинамічного полігону. Обґрунтовано можливість використання запропонованої методики для дослідження форми еквіпотенціальних поверхонь із міліметровою точністю.

Розроблено технологічні параметри для побудови геодинамічних полігонів та виконання геодезичних досліджень на них, що дають можливість забезпечити визначення відхилень прямовисних ліній з точністю 0,1–0,2".

Теоретично обґрунтовано, що дані про зміни у формі еквіпотенціальної поверхні дають уявлення не тільки про основні геологічні процеси, гравітаційні потенціали, але і можливість короткочасного прогнозування деформацій земної поверхні.

Література

1. Bagheri-Gavkosh M.; Hosseini S.M.; Ataie-Ashtiani B.; Sohani Y.; Ebrahimian H.; Morovat F.; Ashrafi S. Land subsidence: A global challenge. *Science of the Total Environment*. 2021, 778, 146193. PMID: 33725610.
2. Herrera-García G.; Ezquerro P.; Tomas R.; Béjar-Pizarro M.; López-Vinielles J.; Rossi M.; Mateos R.M.; Carreón-Freyre D.; Lambert J.; Teatini P.; et al. Mapping the global threat of land subsidence. *Science*. 2021, 371, 34–36.
3. Massonnet D.; Feigl K.L. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Revie of Geophys*. 1998, 36, 441–500.
4. Gabriel A.K.; Goldstein R.M.; Zebker H.A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*. 1989, 94, 9183–9191.
5. Sentinel-1 – Missions – Sentinel Online – Sentinel Online. Sentinel Online. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1>
6. Raspini F.; Bianchini S.; Ciampalini A.; Del Soldato M.; Solari L.; Novali F.; Del Conte S.; Rucci A.; Ferretti A.; Casagli N. Continuous, semi-automatic monitoring of ground deformation using Sentinel-1 satellites. *Scientific Reports*. 2018, 8, 1–11.
7. Kalia A.C.; Frei M.; Lege T. A. Copernicus downstream-service for the nationwide monitoring of surface displacements in Germany. *Remote Sensing Environment*. 2017, 202, 234–249.
8. Burak K. O., Yarosh K. On prospects of astronomic-geodesic leveling for coordinate support of geodynamic and technogenic polygons. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*. 2021, 93, 85–93. URL: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2021.93.085>
9. Burak K. On the accuracy of gravimetric provision of astronomic-geometric leveling on geodynamic and technogenic polygons. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*. 2022, 95, 39–52. URL: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2022.95.039>
10. Двудіт П. Д.; Голубінка Ю. І. Визначення відхилень виска за наземними гравіметричними даними і супутниковими вимірами. *Вісник геодезії та картографії*. 2005, 2, 12–21.
11. Двудіт П. Д.; Голубінка Ю. І. Про визначення гравіметричних складових відхилень прямовисних ліній. *Вісник геодезії та картографії*. 2008, 2, 7–9.
12. Dvulit P. D.; Dvulit Z. P.; Sidorov I. S. Determination of plumb lines with using trigonometric levelling and GNSS measurements. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*. 2019, 89, 12–19. URL: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2019.01.012>
13. Ceylan A. Determination of the deflection of vertical components via GPS and leveling measurement: A case study of a GPS test network in Konya, Turkey. *Scientific Research and Essay*. 2009, 4 (12), 1438–1444. URL: <http://www.academichournal.org/SRE>. – ISSN 1992- 2248
14. Cigna F.; Esquivel Ramírez R.; Tapete D. Accuracy of Sentinel-1 PSI and SBAS InSAR Displacement Velocities against GNSS and Geodetic Leveling Monitoring Data. *Remote Sensing*. 2021, 13, 4800–4812. URL: <https://doi.org/10.3390/rs13234800>
15. Hirt C.; Schmitz M.; et al. Mutual validation of GNSS height measurements and high-precision geometric-astronomical leveling. *GPS Solutions*. 2010, 15 (2), 149–159. URL: <https://doi.org/10.1007/s10291-010-0179-3>
16. Beutler G.; Brockmann E. Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the international GPS service for geodynamics (IGS): Theory and initial results. *Manuscripta geodaetica*. 1994, 19, 367–386.
17. Wübbena G.; Schmitz M.; Menge F.; Boder V.; Seeber G. Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time. *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS 2000*. 2000, 2512 - 2522.
18. Rothacher M. Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations. *GPS Solutions*. 2001, 4, 55–60.
19. Schmid R.; Steigenberger P.; Gendt G.; Ge M.; Rothacher M. Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas. *Journal of Geodesy*. 2007, 81, 781–798.

20. Saastamoinen J. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites. *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*. 1997, 15, 247–251.
21. Boehm J.; Werl B.; Schuh H. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*. 2006, 111, 1–9.

References

1. Bagheri-Gavkosh M.; Hosseini S.M.; Ataie-Ashtiani B.; Sohani Y.; Ebrahimian H.; Morovat F.; Ashrafi S. (2021) Land subsidence: A global challenge. *Science of the Total Environment*. 778, 146193. PMID: 33725610.
2. Herrera-García G.; Ezquerro P.; Tomas R.; Béjar-Pizarro M.; López-Vinielles J.; Rossi M.; Mateos R.M.; Carreón-Freyre D.; Lambert J.; Teatini P.; et al. (2021). Mapping the global threat of land subsidence. *Science*. 371, 34–36.
3. Massonnet D.; Feigl K.L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Revie of Geophys*. 36, 441–500.
4. Gabriel A.K.; Goldstein R.M.; Zebker H.A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*. 94, 9183–9191.
5. Sentinel-1 – Missions – Sentinel Online – Sentinel Online. Sentinel Online. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1>
6. Raspini F.; Bianchini S.; Ciampalini A.; Del Soldato M.; Solari L.; Novali F.; Del Conte S.; Rucci A.; Ferretti A.; Casagli N. (2018). Continuous, semi-automatic monitoring of ground deformation using Sentinel-1 satellites. *Scientific Reports*. 8, 1–11.
7. Kalia A.C.; Frei M.; Lege T. A. (2017). Copernicus downstream-service for the nationwide monitoring of surface displacements in Germany. *Remote Sensing Environment*. 202, 234–249.
8. Burak K. O., Yarosh K. (2021). On prospects of astronomic-geodesic leveling for coordinate support of geodynamic and technogenic polygons. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*. 93, 85–93. URL: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2021.93.085>
9. Burak K. (2022). On the accuracy of gravimetric provision of astronomic-geometric leveling on geodynamic and technogenic polygons. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*. 95, 39–52. URL: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2022.95.039>
10. Dvulit P. D., Holubinka Yu. I. (2005). Determination of elevation deviations based on ground gravimetric data and satellite measurements. *Visnyk heodezii ta kartohrafi*. 2, 12–21.
11. Dvulit P. D., Holubinka Yu. I. (2008). On the determination of gravimetric components of straight line deviations». *Visnyk heodezii ta kartohrafi*. 2, 7–9.
12. Dvulit P. D.; Dvulit Z. P.; Sidorov I. S. (2019). Determination of plumb lines with using trigonometric levelling and GNSS measurements. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*. 89, 12–19. URL: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2019.01.012>
13. Ceylan A. (2009). Determination of the deflection of vertical components via GPS and leveling measurement: A case study of a GPS test network in Konya, Turkey. *Scientific Research and Essay*. 4 (12), 1438-1444. URL: <http://www.academicijournal.org/SRE>. – ISSN 1992- 2248
14. Cigna F.; Esquivel Ramírez R.; Tapete D. (2021). Accuracy of Sentinel-1 PSI and SBAS InSAR Displacement Velocities against GNSS and Geodetic Leveling Monitoring Data. *Remote Sensing*. 13, 4800–4812. URL: <https://doi.org/10.3390/rs13234800>
15. Hirt C.; Schmitz M.; et al. (2010). Mutual validation of GNSS height measurements and high-precision geometric-astronomical leveling. *GPS Solutions*. 15 (2), 149–159. URL: <https://doi.org/10.1007/s10291-010-0179-3>
16. Beutler G.; Brockmann E. (1994). Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the international GPS service for geodynamics (IGS): Theory and initial results. *Manuscripta geodaetica*. 19, 367–386.
17. Wübbena G.; Schmitz M.; Menge F.; Boder V.; Seeber G. (2000). Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time. *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS 2000*. 2512 - 2522.
18. Rothacher M. (2001). Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations. *GPS Solutions*. 4, 55–60.
19. Schmid R.; Steigenberger P.; Gendt G.; Ge M.; Rothacher M. (2007). Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas. *Journal of Geodesy*. 81, 781–798.
20. Saastamoinen J. (1997). Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites. *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*. 15, 247–251.
21. Boehm J.; Werl B.; Schuh H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*. 111, 1–9.

Стаття надійшла до редакції 09.01.2023 р.