

Міністерство освіти і науки України  
Київський національний університет будівництва і архітектури

**АННЕНКОВ АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 528.48

**ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ЗАСТОСУВАННЯ ГНСС-ТЕХНОЛОГІЙ В  
ЗАДАЧАХ ГЕОДЕЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ІНЖЕНЕРНИХ  
СПОРУД**

05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія та картографія

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Київському національному університеті будівництва і архітектури, Міністерство освіти і науки України.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор  
**Шульц Роман Володимирович**,  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
професор кафедри інженерної геодезії, м. Київ.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Бурак Костянтин Омелянович**,  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
завідувач кафедри геодезії та землеустрою, м. Івано-Франківськ;

доктор технічних наук, професор  
**Куліковська Ольга Євгенівна**,  
Криворізький національний університет, професор кафедри геодезії, м. Кривий Ріг;

доктор технічних наук, професор  
**Уль Анна Володимирівна**,  
Волинський національний університет імені Лесі Українки,  
завідувача кафедри геодезії, землевпорядкування та кадастру, м. Луцьк.

Захист відбудеться "30" квітня 2021 р., о 10<sup>00</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.09 у Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, Київ-37, Повітрофлотський проспект, 31, ауд. 466.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, Київ-37, Повітрофлотський проспект, 31.

Автореферат розісланий "27" березня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук, доцент

 О.П. Ісаєв

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Геодезичний моніторинг є однією з найважливіших складових загальної системи моніторингу за будь-якими явищами та процесами, що відбуваються на поверхні землі, в підземному та навколорозземному просторі. Сучасний геодезичний моніторинг оперує величезними об'ємами даних, що поступають від різних вимірювальних засобів (ГНСС, електронні тахеометри, датчики нахилу та ін.). Серед процесів та явищ, які потребують організації геодезичного моніторингу особливе місце посідають деформаційні процеси, що відбуваються при будівництві та експлуатації інженерних споруд. Сучасні інженерні споруди характеризуються екстремальними значеннями геометричних параметрів, як то висота, глибина, довжина. З іншого боку ці особливі характеристики поєднуються із несприятливими умовами зведення та експлуатації інженерних споруд, які в теперішній час будують практично в будь-яких кліматичних зонах та геологічних умовах. Сучасний стан більшості крупних інженерних споруд в Україні, до яких слід віднести мости, системи гребель, висотні будівлі, спортивні споруди, і т.п., у більшості випадків вимагає проведення невідкладних заходів щодо організації системи моніторингу за їх станом.

Високі вимоги до геодезичного моніторингу досягаються шляхом поступового ускладнення систем геодезичного моніторингу та поступового підвищення рівня автоматизації таких систем. Сучасні системи геодезичного моніторингу включають не тільки геодезичне обладнання, на сьогоднішній день можна вести мову про геодезично-геотехнічний моніторинг. Головна відмінність та перевага геодезичних засобів моніторингу перед геотехнічними – це можливість визначення абсолютних величин переміщень відносно наперед заданої системи координат. Основним компонентом сучасних систем геодезичного моніторингу є ГНСС-технології, які дозволяють визначити взаємні та глобальні переміщення досліджуваної споруди. Тому актуальним питанням є окреме дослідження ГНСС-технології, як складової комплексної системи моніторингу інженерних споруд.

Особливістю ГНСС-технологій є їх самодостатність, тобто можливість ведення геодезичного моніторингу без залучення додаткових вимірювальних засобів та одночасно виконувати функції, як геодезичної основи для ведення геодезичного моніторингу, так і системи спостереження за деформаціями інженерних споруд. Частота збирання даних дозволяє вести мову про неперервний моніторинг із частотою 1-10Гц. Такі обставини роблять ГНСС-технології особливо привабливими для організації геодезичного моніторингу. Водночас використання ГНСС-технологій для вирішення задач геодезичного моніторингу вимагає відповіді на цілу низку питань.

До теперішнього часу актуальними залишаються завдання оптимізації ГНСС-мереж, розроблення методик і технологій геодезичного моніторингу засобами ГНСС, вдосконалення методів та моделей опрацювання результатів ГНСС-спостережень, розроблення математичних моделей та дослідження методик комбінованого використання ГНСС-технологій та наземних спостережень. Досить обмежено представлено технологію моніторингу засобами ГНСС у діючій нормативній літературі, і загалом відсутні будь-які матеріали методичного

характеру. Особливу увагу слід звернути на представлення результатів моніторингу у вигляді моделей прогнозування деформаційних процесів моніторингу інженерних споруд. Комплексне вирішення поставлених завдань є важливою та актуальною проблемою сучасної інженерної геодезії.

Перераховані завдання охоплюють основні сучасні напрямки в яких розвиваються дослідження ГНСС-технологій в світі. Завдяки своєму широкому розповсюдженню, дослідження ГНСС-технологій ведеться у всіх куточках світу. В контексті поставленої нами проблеми застосування ГНСС-технологій в задачах геодезичного моніторингу провідними є наукові та навчальні установи Відня, Граца (Австрія), Ганновера (Німеччина), Дельфту (Нідерланди), Новосибірська (Росія), Нового Брунсвіка (Канада), Огайо (США), Цюріха (Швейцарія). Активну діяльність в цьому напрямку ведуть наукові підрозділи країн розробників ГНСС та фірм виробників ГНСС-обладнання. Серед вчених, які отримали вагомі наукові результати слід відзначити праці закордонних та вітчизняних фахівців: Atkins C., Ayan T., Borre K., Brown C.J., Brownjohn J., Cannon E., Chrzanowski A., Cong X.Y., Van Cranenbroeck J., Dodson A., Ding K., Erol S., Erol B., Fraser S., Ge L., Hofmann-Wellengof B., Hu Y., Jäger R., Kälber S., Li X., Lighteneger G., Liu G., Meng X., Ogundipe O., Paffenholz J.-A., Parkinson B.W., Rehr I., Rizos C., Roberts G.W., Sheng L., Spilker J. J. Jr., Stiros S.C., Strang G., Strübing T., Tait M., Tamura Y., Teskey W.F., Tsakiri M., Wegner J.D., Whitaker C., Yoshida A., Zhang K., Антонович К.М., Ассане А.А., Бурак К.О., Дударев В.И., Сото М.Т., Куліковська О.Є., Костецька Я.М., Кучер О.В., Третяк К.Р., Тревого І.С., Уль А.В., Черняга П.Г.

При розгляді питання геодезичного моніторингу обов'язковим є удосконалення методики призначення точності моніторингу та інтервалів спостережень, оптимізації геодезичних мереж для спостережень та побудова моделей прогнозування деформаційних процесів. Цим теоретичним питанням присвячені роботи багатьох відомих вчених, слід відмітити дослідження: Відуєва М.Г., Гуляєва Ю.П., Григоренко А.Г., Ключина Є.Б., Лебедева М.М., Левчука Г.П., Лобова М.І., Новака В.Є., Панкрушина В.К., Сидоренко В.Д., Тамутица З.П., Черняги П.Г., Collier P., Eichhorn A., Grafarend E., Koráček A., Lehmann M., Lienhart W., di Mauro M., Milev I., Neitzel F., Niemeier W., Scaioni M., Setan H., Szostak-Chrzanowski A., Weisbrich S.

В наведеному переліку представлені найбільш потужні роботи в контексті обраного напрямку дослідження. Головним напрямом дослідження є розроблення комплексного підходу до використання ГНСС-технологій у вирішенні завдань геодезичного моніторингу інженерних споруд.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота пов'язана з реалізацією Постанови Кабінету Міністрів України від 13 квітня 2011 р. № 471 "Про затвердження Програми перегляду державних будівельних норм і правил на період до 2015 року". Результати дисертаційної роботи можуть бути використані при реалізації Постанови Кабінету Міністрів України від 16 жовтня 1998 р. № 1641 "Про організацію системи оперативного контролю за зсувонебезпечними ділянками з використанням новітніх технологій". Зміст роботи відповідає завданням Розпорядження Кабінету Міністрів України № 2354-р від 29 грудня 2010 р. «Про схвалення Концепції Державної цільової науково-технічної

програми розвитку топографо-геодезичної діяльності та національного картографування на 2014-2018 роки».

Дослідження пов'язано з тематикою науково-дослідних робіт, які виконувались за участі автора:

- «Науково-технічний супровід стадіону «Донбасс-Арена», виконаний Донбаською національною академією будівництва і архітектури у 2010-2012 роках на замовлення Донецького ПромбудНДІпроект;
- «Розробка науково-інформаційних ресурсів з моніторингу інженерних споруд», виконаних ООО «Донецька технічна компанія» у рамках науково-дослідних робіт «Технічне обстеження будівель та споруд ПАО «МК «АЗОВСТАЛЬ» та «Моніторинг за деформаціями будівель та споруд ПАО «ММК ІМ. ІЛЛІЧА», які виконувались у 2006-2014 роках на замовлення «Метінвест Холдінг»;
- «Створення аналітичної системи геодинамічного моніторингу» у рамках науково-дослідних робіт «Державної цільової програми відновлення та розбудови миру в східних регіонах України», які виконувались ПП «Інноваційна науково-технічна експертна компанія» у 2017-2021 роках на замовлення Донецької обласної військово-цивільної адміністрації.

Дисертаційна робота виконана згідно з планом наукової роботи кафедри інженерної геодезії Київського національного університету будівництва і архітектури.

**Мета і задачі дослідження.** *Метою* роботи є вирішення науково-прикладної проблеми застосування ГНСС-технологій при розв'язанні завдань геодезичного моніторингу інженерних споруд. Головний науковий результат полягає у розробленні теоретичних основ і практичних рекомендацій щодо проектування вимірювань та створення ГНСС-мереж, виконання ГНСС-вимірювань, аналізу результатів ГНСС-вимірювань, опрацювання та інтерпретації результатів ГНСС-вимірювань на сучасному науково-технічному рівні.

Для досягнення цієї мети в роботі поставлені наступні *завдання*:

- 1) виконати класифікацію методів геодезичного моніторингу та проаналізувати сучасний стан застосування ГНСС-технологій при вирішенні завдань геодезичного моніторингу;
- 2) проаналізувати системи координат та розробити моделі перетворення висот при виконанні геодезичного моніторингу засобами ГНСС;
- 3) провести теоретичне та експериментальне дослідження методів оптимізації геодезичних мереж, які створюються засобами ГНСС;
- 4) удосконалити математичні моделі контролю стабільності пунктів просторових ГНСС-мереж;
- 5) розробити методику та математичну модель моніторингу територій зведення та експлуатації інженерних споруд методом скінченних елементів;
- 6) розробити методику попереднього розрахунку точності та інтервалів спостережень при виконанні геодезичного моніторингу методами ГНСС-спостережень;
- 7) розробити методику попереднього розрахунку точності комбінованих наземних та ГНСС-спостережень при виконанні геодезичного моніторингу інженерних споруд;

- 8) розробити методику виконання комбінованих наземних та ГНСС-спостережень при виконанні геодезичного моніторингу інженерних споруд;
- 9) провести експериментальні дослідження ГНСС-вимірювань при виконанні геодезичного моніторингу інженерних споруд;
- 10) удосконалити математичні моделі прогнозування деформаційних процесів на прикладі результатів експериментальних спостережень за різними типами інженерних споруд, отриманих засобами ГНСС-технологій.

**Об'єкт дослідження:** глобальні навігаційні супутникові системи.

**Предмет дослідження:** геодезичний моніторинг інженерних споруд засобами ГНСС-технологій.

**Методи дослідження** дозволяють повністю вирішити поставлені завдання дослідження. Для дослідження методів оптимізації геодезичних мереж і розроблення математичної моделі сумісного опрацювання результатів комбінованих наземних та ГНСС-спостережень використано методи найменших квадратів, матричної алгебри, лінійного програмування та статистичного моделювання методом Монте-Карло. Дослідження стабільності ГНСС-мереж виконано із використанням методів математичної статистики. Розроблення методики нормування точності геодезичного моніторингу засобами ГНСС базується на основних положеннях теорії похибок вимірювань. Удосконалення математичних моделей прогнозування деформаційних процесів базується на методах теорії динамічних систем, різних варіантах методу фільтрації за Калманом, методах згладжування динамічних спостережень та методах апроксимації з використанням нейронних мереж. Дослідження точності ГНСС-вимірювань виконано з використанням статистичних методів, зокрема дисперсійного аналізу та статистичної перевірки гіпотез.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в отриманні теоретичних і практичних результатів щодо вирішення науково-прикладної проблеми використання ГНСС-технологій для завдань геодезичного моніторингу інженерних споруд. Отримані результати дозволяють сформулювати наступні наукові положення:

- 1) запропоновано методику і технологію дослідження методів оптимізації геодезичних мереж, які створюються засобами ГНСС, що дозволило удосконалити технологію проектування ГНСС-мереж;
- 2) запропоновано математичну модель та методику перетворення висот із використанням глобальних моделей геоїда, що дозволяє виконувати перетворення висот та їх уточнення під час моніторингу;
- 3) удосконалено математичну модель контролю стабільності пунктів ГНСС-мереж, що дозволяє за результатами статистичного аналізу виявляти пункти, що зазнали найбільших переміщень та встановлювати наявність деформаційного процесу;
- 4) запропоновано математичну модель та методику дослідження переміщень великих інженерних споруд за результатами ГНСС-спостережень, що базується на використанні методу скінченних елементів і дозволяє виявити місця концентрації деформацій.
- 5) розроблено систему нормування точності виконання геодезичного моніторингу засобами ГНСС-технологій, яка дозволяє встановити необхідну точність та

інтервали спостережень для різних типів інженерних споруд;

- б) вперше розроблено методику виконання попереднього розрахунку точності комбінованих наземних та ГНСС-спостережень при виконанні геодезичного моніторингу інженерних споруд, яка призначена для оптимального проектування систем геодезичного моніторингу;
- 7) розроблено нові та удосконалено існуючі математичні моделі прогнозування деформаційних процесів на прикладі результатів експериментальних спостережень за різними типами інженерних споруд, отриманих засобами ГНСС-технологій.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в розробленні технологій та практичних рекомендацій стосовно впровадження ГНСС-технологій в практику вирішення задач геодезичного моніторингу. Отримані практичні результати, можуть бути використані для:

- розроблення методики та технології виконання польових і камеральних робіт при вирішенні задач геодезичного моніторингу засобами ГНСС-технологій;
- розроблення та вдосконалення існуючих автоматизованих систем геодезичного моніторингу;
- удосконалення програмного забезпечення для опрацювання ГНСС-мереж та комбінованих геодезичних мереж;
- удосконалення існуючої нормативно-технічної бази в частині організації та проведення геодезичного моніторингу інженерних споруд.

Отримані практичні результати сприятимуть більш надійній організації систем геодезичного моніторингу за відповідальними та небезпечними інженерними спорудами, що дозволить подовжити терміни безаварійного функціонування споруд та дотримуватися максимального рівня безпеки під час їх експлуатації.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри інженерної геодезії Київського національного університету будівництва і архітектури при підготовці курсів навчальних дисциплін «Геодезія» та «Інженерна геодезія»; Донецького національного університету; Криворізького національного університету; Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Практичні результати застосовані при виконанні проектних та вишукувальних робіт наступними Науково-дослідними установами: Маріупольський ПромБудНДІПроект»; «Державний науково дослідний інститут будівельних конструкцій»; «Науково дослідний інститут будівельного виробництва»; ПП «Інноваційна науково-технічна експертна компанія»; ООО «Донецька технічна компанія». Практична цінність підтверджено відповідними актами про впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Результати досліджень, що викладено в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно, що підтверджується одноосібними публікаціями з ключових аспектів проблеми, а саме: аналіз сучасного стану та технічних можливостей ГНСС-технологій для вирішення задач геодезичного моніторингу; класифікація методів ведення геодезичного моніторингу; аналіз сучасного стану та технічних можливостей ГНСС-технологій; аналіз та дослідження методів оптимізації ГНСС-мереж; проведення статистичного моделювання деформаційних ГНСС-мереж; нормування точності геодезичного

моніторингу інженерних споруд засобами ГНСС-технологій; методика виконання попереднього розрахунку точності комбінованих наземних та ГНСС-спостережень при виконанні геодезичного моніторингу інженерних споруд; вдосконалення методів та моделей опрацювання результатів ГНСС-спостережень для задач виконання геодезичного моніторингу; розроблення методики та технології виконання польових і камеральних робіт при вирішенні задач геодезичного моніторингу засобами ГНСС-технологій.

У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: [4] – визначення та опрацювання осадок деформаційних реперів конструктивних блоків стадіону; [7] – розроблення методики виконавчого знімання в комбінації інженерно-геодезичних і супутникових вимірювань та математична обробка результатів зйомки; [8] – комплексний аналіз аварійних ситуацій інженерних споруд та побудова профільних ліній; [9] – розроблення блок-схеми визначення деформацій інженерних споруд ГНСС засобами; [10] – формування концепції автоматизованої системи геодезичного моніторингу із комплексним застосуванням наземних та супутникових зйомок; [11] – розробка та дослідження технологічної схеми спостережень за зсувними процесами; [12] – побудова та геодезичні спостереження за деформаціями планово-висотної мережі стадіону; [13] – розроблення алгоритму згладжування фільтра Калмана при обробці геодезичних зйомок інженерних споруд; [14] – математичне обґрунтування точності RTK-спостережень; [15] – виконання геодезичної зйомки просторових покриттів та математична обробка результатів; [16] – виконання розрахунків обсягів інженерно-геодезичних робіт за різними просторовими моделями; [19] – порівняльний аналіз якості обробки результатів спостережень з використанням програмного забезпечення GrafNav/GrafNet і українського програмного комплексу ОСТАВА; [20] – дослідження температурного впливу на конструкції висотної будівлі та математична обробка геодезичних спостережень; [21] – аналіз переміщень багатоповерхівки з апроксимацією результатів спостережень просторовими кривими; [22] – розроблення методики виконання обробки геодезичних спостережень за допомогою фільтра Калмана; [23] – дослідження впливу зміщення інженерної споруди за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу; [24] – вдосконалення методики опрацювання комбінованих геодезичних вимірів; [25] – аналіз сучасних методик геодезичних спостережень; [26] – вдосконалення системи геодезичного моніторингу висотних будівель; [28] – розробка методики попереднього розрахунку точності комбінованих наземних та ГНСС-спостережень; [31] – розробка методики трансформування систем координат геодезичних вимірів

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації доповідались і обговорювались на щорічних науково-практичних семінарах та міжнародних конференціях: науково-практичні конференції молодих вчених Донбаської національної академії будівництва і архітектури (м. Макіївка, 2005-2007 рр.); Міжнародна конференція «Геодезичне забезпечення будівництва» (Київ, 19-20 жовтня 2011р.); 2-й Міжнародний промисловий форум GEOFORM+ (Москва, 14-17 березня, 2005р); Міжнародний науково-технічний симпозіум «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища. GPS і ГІС-технології» (АР Крим, м. Алушта, 2013 р); Науково-технічна конференція присвячена 60-тиріччю кафедри



геоінформатики та геодезії ДонНТУ (м. Донецьк, 2013 р.); ГЕОФОРУМ (м. Львів, 2013 р.); ГЕОФОРУМ-2018 (м. Львів, 2018); ГЕОПРОСТІР-2015 (м. Київ); ГЕОПРОСТІР-2017 (м. Київ); «Инновации и ГИС технологии для развития территорий» (м. Усть-Каменогорськ, Республіка Казахстан, 2014 р.); Міжнародний науковий конгрес «Интерекспо ГеоСибирь – 2015» (Новосибірськ, РФ, 2015 р.); «Перезавантаження будівництва: Економіка, організація, менеджмент»: Друга міжнародна науково-практична конференція. 09-11 листопада 2016р. Київ. 2016.; Міжнародний науковий конгрес «ГеоСибирь – 2016» (Новосибірськ, РФ, 2016 р.); 11th International Conference “Environmental Engineering” Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania, 2020; Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція "Розвиток промисловості та суспільства» 2020 р." м.Кривий Ріг.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 31 наукова праця (10 з них одноосібно), а саме: 5 – у наукових періодичних виданнях інших держав з наряду дисертації, у тому числі 2 у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз SCOPUS (Q2, Q4) та Web of Science; 18 – у вітчизняних періодичних виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань з технічних наук, визначених МОН України, у тому числі 7 у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз; 8 – в інших наукових виданнях та у збірниках праць за матеріалами конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації - 356 сторінок, з них 310 сторінок основного тексту, 212 рисунків та 54 таблиць, в тому числі такі, що розміщені на 31 окремому аркуші, список використаних джерел з 292 найменувань на 34 сторінках та 5 додатків на 21 сторінці.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та методи її досягнення, визначено наукову новизну та практичне значення досліджень, коротко розкрито основний зміст роботи.

У розділі 1 «**Аналіз сучасного стану та технічних можливостей ГНСС-технологій в задачах геодезичного моніторингу інженерних споруд**» розглянуто різні класифікації інженерних споруд, причини їх руйнування, виконано аналіз впливу різних факторів на зміну просторового положення і геометрії сучасних інженерних споруд в контексті проблеми сучасного геодезичного моніторингу. Проаналізовано сучасний стан проблеми моніторингу та особливості застосування ГНСС-технологій в задачах геодезичного моніторингу інженерних споруд. Виконано аналіз сучасних систем моніторингу на базі ГНСС-обладнання.

Визначено фактори, що призводять до зміни геометрії та місцеположення інженерних споруд у часі. Навантаження, що спричиняють такі зміни можуть бути викликані взаємодією із навколишнім середовищем, виконанням інженерною спорудою її основних функцій, конструктивними особливостями та терористичними атаками, та описуються характеристиками, наведеними у табл. 1.

## Характеристики навантажень

Характеристика	Особливість
Тривалість	Тимчасове або постійне
Просторовий розподіл	Концентроване або розподілене
Часовий розподіл	Імпульсне; циклічне; квазі-статичне
Рівень достовірності	Повторного навантаження; ймовірність виникнення

Відмічено, що за даними різних досліджень, результатом порушення функціонування та руйнування інженерних споруд можуть бути помилки на різних етапах зведення споруд – від проектування до експлуатації. Вплив цих помилок проявляється під впливом навантажень. Загальна статистика показує, що серед основних причин руйнування інженерних споруд можна виокремити п'ять основних. Розподіл частки аварійних ситуацій інженерних споруд, в залежності від причин, представлено на рис. 1.

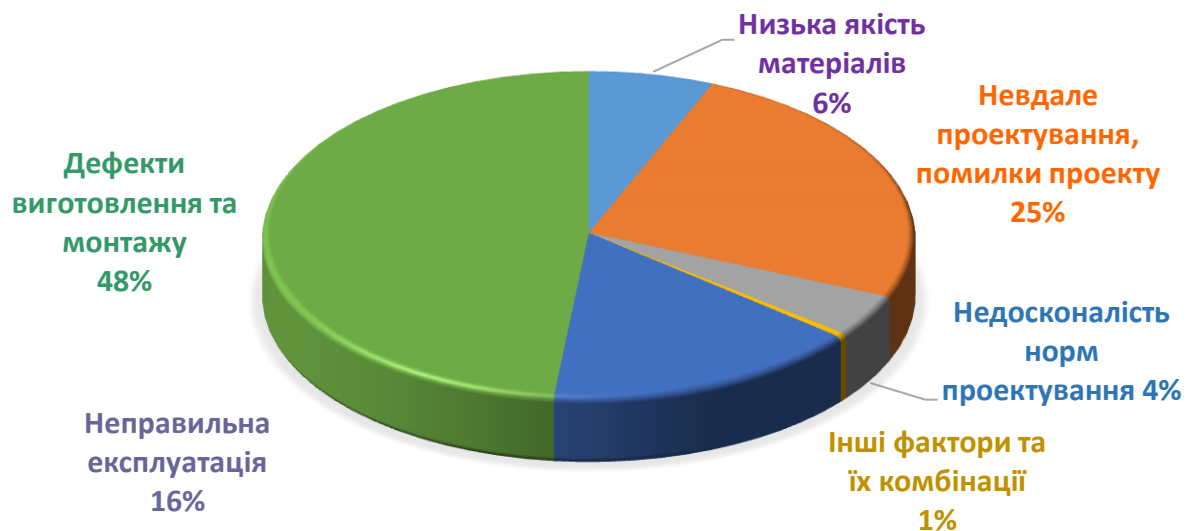


Рис. 1. Причини руйнування інженерних споруд (за даними А.В. Шимановського)

Виявити помилки можливо лише за результатами їх прояву у вигляді, зміни фізичних властивостей матеріалів споруди, ушкодження окремих елементів споруди та за результатами вимірювання локальних та глобальних переміщень інженерної споруди та окремих її елементів, що і є основним завданням геодезичного моніторингу. Результати аналізу вказують на можливість використання ГНСС-технологій для фіксації результатів впливу різних навантажень.

Виконано систематизацію та класифікацію існуючих методів геодезичного моніторингу за розмірністю переміщення. Виділено два класи методів: абсолютні та відносні. В середині кожного з цих класів виокремлено чотири групи методів: осьові, висотні, планові, просторові. У свою чергу просторові методи було класифіковано та проаналізовано за наступними ознаками: ступінь пророблення методу; надійність отриманих результатів; вартість устаткування; доступність технології; рівень автоматизації та простота користування.

Порівняльний аналіз дозволяє зробити висновок, що з існуючих на сьогоднішній день методів найбільш повно поставленим завданням геодезичного

моніторингу відповідають методи спостережень з використанням ГНСС-технологій та побудови просторових геодезичних мереж.

Порівняння цих двох методів за вказаними критеріями вказує на певну перевагу ГНСС-методу, як такого який при умові повної автоматизації не поступається методам моніторингу за допомогою роботизованих електронних тахеометрів і одночасно не вимагає прямої видимості між опорними, допоміжними та деформаційними знаками.

В результаті системного дослідження сучасного стану та технічних можливостей ГНСС-технологій для вирішення завдань геодезичного моніторингу, було розроблено узагальнену технологічну схему виконання геодезичного моніторингу інженерних споруд засобами ГНСС-технологій (рис. 2).

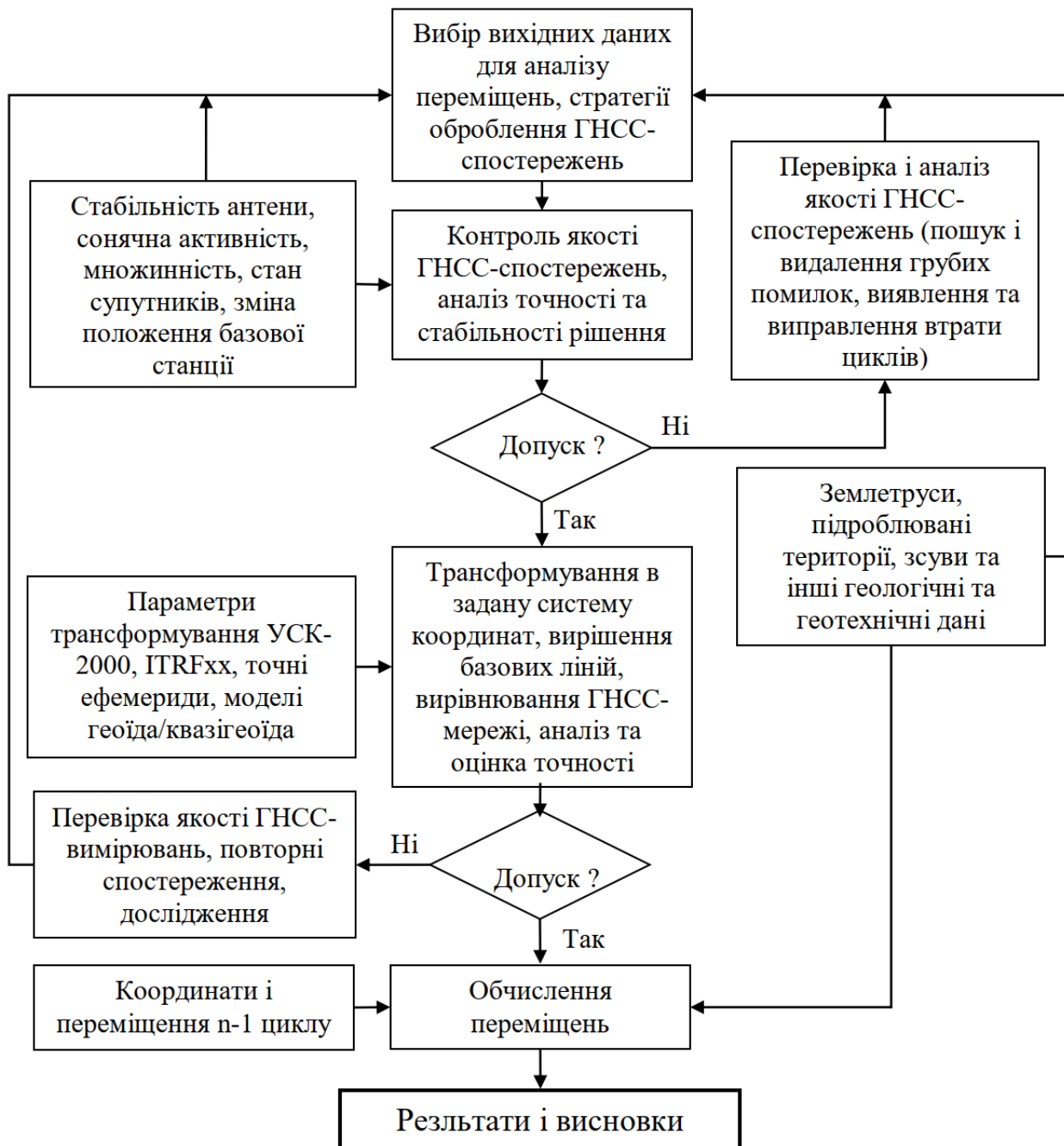


Рис. 2. Технологічна схема моніторингу інженерних споруд засобами ГНСС-технологій

У розділі проаналізовано функції та можливості ГНСС-технологій, як складової автоматизованої системи геодезичного моніторингу. За результатами аналізу встановлено, що:

1. До складу будь-якої системи геодезичного моніторингу входить ГНСС-обладнання, ступінь використання якого є різною і викликана не повним дослідженням можливостей ГНСС-технологій.

2. В більшості автоматизованих систем основним джерелом інформації є ГНСС або електронній тахеометри. Якщо мережа створюється тільки з використанням ГНСС-технологій, то станції моніторингу створюються, або у вигляді ГНСС-станцій, або станцій з електронними тахеометрами. Порівнюючи можливості реалізації цих варіантів, можна відмітити, наступні переваги і недоліки (табл. 2):

*Таблиця 2*

**Порівняння ГНСС та роботизованих тахеометрів**

<b>Метод</b>	<b>Переваги</b>	<b>Недоліки</b>
<b>ГНСС станція/станція-моніторингу</b>	великі відстані	обмежена однією точкою
	висока швидкість реєстрації	
	не вимагає прямої видимості	
<b>Станція моніторингу на базі роботизованого тахеометра</b>	висока точність	відносно короткі відстані < 2,5км
	спостереження необмеженої кількості точок	забезпечення прямої видимості

Таким чином найбільш перспективним напрямком досліджень є саме комбіноване використання ГНСС та електронних тахеометрів як єдиного комплексу геодезичного моніторингу.

3. Структурна модель та математичні зв'язки у більшості систем геодезичного моніторингу є закритими і в світі практично відсутні публікації по дослідженню точності та ефективності таких системи. Цей факт стимулює необхідність поглибленого дослідження ГНСС-технологій у поєднанні в першу чергу із електронними тахеометрами.

Наведені в розділі дослідження дозволили визначити основні проблеми та перспективи застосування ГНСС-технологій в задачах геодезичного моніторингу. Сформульовано основні задачі, вирішення яких дасть можливість досягти мети, що поставлена в роботі та основні напрямки досліджень, на яких слід зосередити головну увагу при розробленні теорії і практики застосування ГНСС-технологій в задачах геодезичного моніторингу інженерних споруд.

У розділі 2 «**Координатне забезпечення геодезичного моніторингу засобами ГНСС-технологій**» розглянуто питання введення умовних систем координат і висот та перетворення координат при виконанні моніторингу засобами ГНСС-технологій із урахуванням комбінування ГНСС та вимірювань за допомогою електронних тахеометрів або нівелірів. Досліджено можливість та ефективність використання глобальних моделей геоїда для моделювання систем висот та відхилень прямовисних ліній при об'єднанні ГНСС-мереж та наземних вимірювань.

Враховуючи використання різних відлікових поверхонь та різних систем координат, система координат при виконанні моніторингу має бути визначена до початку моніторингу і показана у проекті. Для наочного представлення відмінностей між системами координат, які використовуються під час моніторингу із застосуванням ГНСС-технологій, на рис. 3 показано особливості кожної з них.

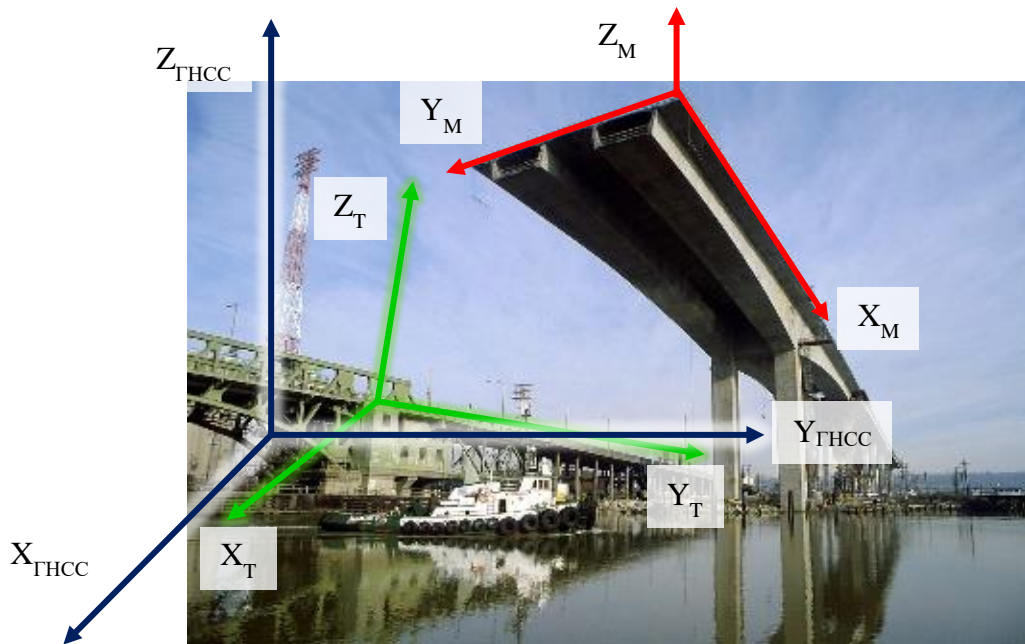


Рис. 3. Зв'язок моніторингової і супутникової систем координат

На рис. 3 позначено: ГНСС – система координат супутникових засобів вимірювання; М – система координат, що задається внутрішньою геодезичною мережею споруди – система координат моніторингу; Т – система координат наземних засобів вимірювання.

Недоліком моделі перетворення координат за Гельмертом є сильна кореляція між визначуваними параметрами переходу від однієї системи координат до іншої, тому запропоновано використовувати перетворення координат за Молоденським, яке пов'язує параметри з центром ваги системи координат.

$$\mathbf{X}_{(2)} = \mathbf{X}_{(1)} + \delta\mathbf{X} + \delta\mathbf{m}\mathbf{R}_{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3}(\mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}})_{(1)} \quad (1)$$

де,  $\mathbf{X}_{(1)}$  – вектор координати точки в першій системі;  $\mathbf{X}_{(2)}$  – вектор координати точки в другій системі;  $\mathbf{R}_{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3}$  – матриця напрямних косинусів;  $\bar{\mathbf{X}}$  – вектор координат центру ваги першої системи;  $\delta\mathbf{X}$  – компоненти зсуву за Молоденським між першою і другою системами;  $\delta\mathbf{m}$  – матриця поправок до масштабних коефіцієнтів.

При об'єднанні ГНСС та наземних спостережень доцільно використовувати принцип тривимірної геодезії. Для забезпечення даного принципу необхідно мати відповідну відлікову поверхню для подальшого моделювання висот та відхилень прямовисних ліній. З огляду на невелику територію, яку займають об'єкти моніторингу, можна прийняти поверхні геоїда і квазігеоїда такими, що співпадають. З практичної точки зору для ділянок розміром до 5 км, поверхня геоїда є достатньо спокійною. Приймаючи до уваги той факт, що при виконанні геодезичного моніторингу супутниковими методами ми визначаємо відносні зміни висотної

складової координат, можна зробити висновок про доцільність використання глобальних моделей геоїда, як відлікової поверхні.

Для детального з'ясування можливостей використання існуючих моделей геоїда в роботі виконано експериментальне дослідження точності існуючих глобальних моделей. Виконано дослідження відомих глобальних моделей: XGM2019e (2019); SGG-UGM-1 (2016); EIGEN-6C4 (2012); EGM2008 (2009), точність яких на загальноземному рівні характеризується СКП 10-12 см. Було з'ясовано, наскільки вказані моделі придатні для моделювання поверхні геоїда для локальних ділянок.

Усі вище наведені моделі геоїда були порівняні із найточнішою на сьогоднішній день моделлю геоїда GEOID2018, що була створена Національною геодезичною службою США і характеризується СКП визначення висоти геоїда 16 мм на всю територію США. Для дослідження було обрано три тестові ділянки на території США, кожна з яких має розмір 5x5 км, різну щільність точок та різну висоту над рівнем моря. Кожна ділянка в середньому мала 50 точок з відомими геодезичними та ортометричними висотами. Якщо для набору точок відомі геодезичні висоти  $H_i$ , визначені за допомогою ГНСС, і ортометричні висоти  $H_i^g$ , тоді є можливість повністю відтворити цифрову модель висот геоїда. Було побудовано карти висот геоїда для різних глобальних моделей. За отриманими даними було розраховано різниці між поверхнями моделі GEOID2018 та іншими моделями. Приклади розрахунків у вигляді карт різниць представлено на рис. 4.

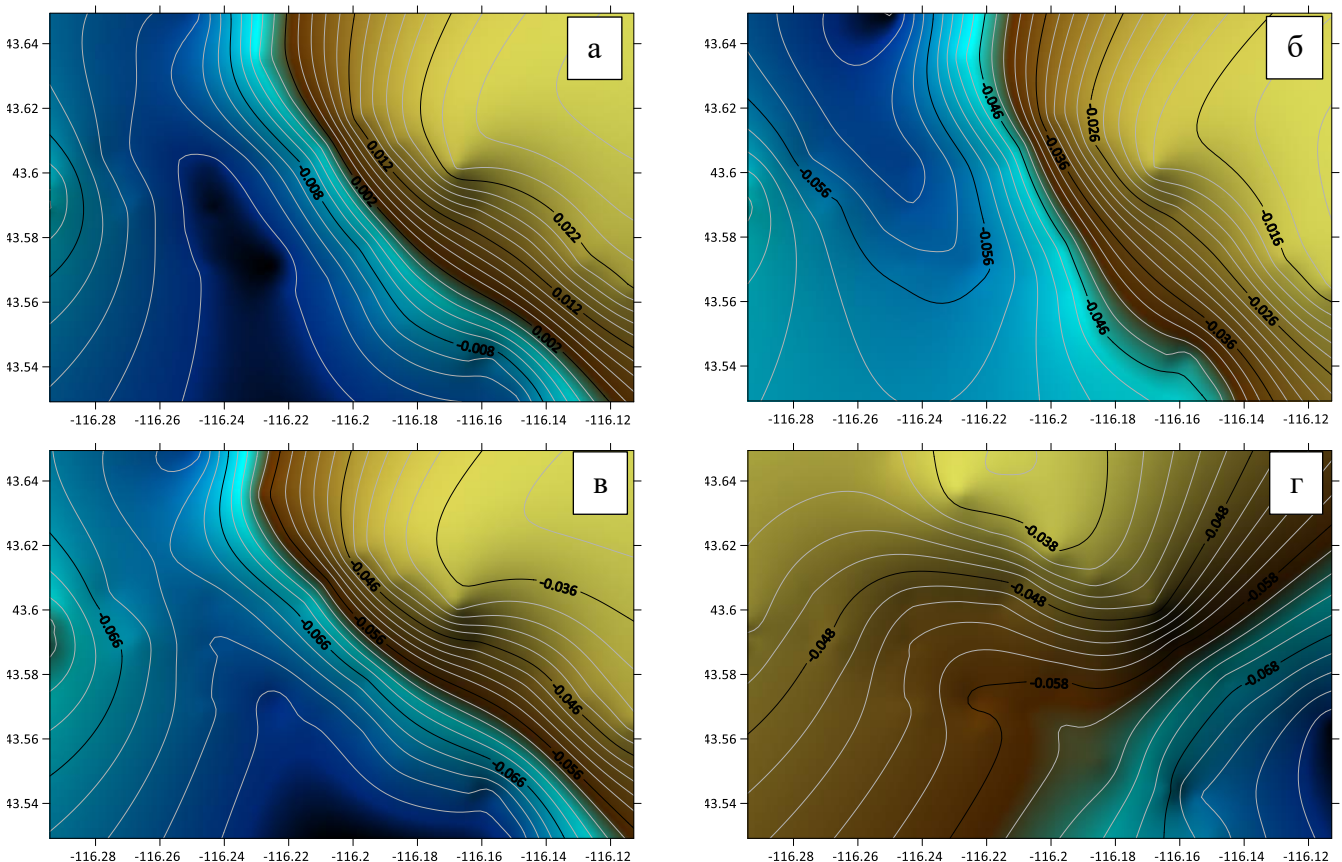


Рис. 4. Карти різниць висот геоїда: а) EGM2008- GEOID 2018; б) EIGEN-6C4- GEOID 2018; в) SGG-UGM-1- GEOID 2018; г) XGM2019e - GEOID 2018

За отриманими різницями для різних глобальних моделей було розраховано статистичні характеристики, що описують відхилення відомих глобальних моделей від моделі GEOID 2018.

Таблиця 3

**Статистичні характеристики глобальних моделей геоїда по відношенню до моделі GEOID 2018 (тестова ділянка №1)**

Модель	Середнє, м	СКП, м	Макс, м	Мін, м
EGM2008	0.0002	0.0160	0.0290	-0.0176
EIGEN-6C4	-0.0411	0.0163	-0.0116	-0.0641
SGG-UGM-1	-0.0586	0.0142	-0.0332	-0.0760
XGM2019e	-0.0533	0.0103	-0.0359	-0.0776

У результаті розрахунку встановлено, що модель EGM2008 має практично нульове відхилення від моделі GEOID2018, та характеризується СКП рівною 16 мм, що дозволяє рекомендувати цю модель для проведення геодезичного моніторингу при об'єднанні ГНСС вимірювань та наземних спостережень.

Якщо у межах ділянки виконання моніторингу існує декілька (більше 3-х) пунктів для кожного з яких із необхідною точністю відомі геодезичні  $H$  і ортометричні висоти  $H^g$ , тоді виникає можливість побудови локального геоїда, шляхом уточнення глобальної моделі. Використовуючи будь-яку з розглянутих моделей геоїда, обчислюють модельні значення висот геоїда  $N^{MOD}$ , та знаходять розходження між дійсними та модельними значеннями висот геоїда:

$$\Delta N = N - N^{MOD}, \quad (2)$$

тоді для пунктів з невідомими ортометричними висотами обчислюють:

$$H^g = H - N^{MOD} + \Delta N, \quad (3)$$

Величини  $\Delta N$  отримують шляхом апроксимації різниць на пунктах з відомими висотами.

Проведено дослідження наступних моделей для апроксимації і уточнення моделі геоїда:

$$\text{Модель 1} \quad \Delta N = x_0 + x_1 \Delta B + x_2 \Delta L, \quad (4)$$

$$\text{Модель 2} \quad \Delta N = x_0 + x_1 \Delta B + x_2 \Delta L + x_3 \Delta B \Delta L + x_4 \Delta B^2 + x_5 \Delta L^2, \quad (5)$$

$$\text{Модель 3} \quad \Delta N = x_0 + x_1 \cos B \cos L + x_2 \cos B \sin L + x_3 \sin B, \quad (6)$$

$$\text{Модель 4} \quad \Delta N = x_0 + x_1 \cos B \cos L + x_2 \cos B \sin L + x_3 \sin B + x_4 \sin^2 B, \quad (7)$$

$$\text{Модель 5} \quad \Delta N = x_0 \cos B \cos L + x_1 \cos B \sin L + x_2 \sin B + x_3 \frac{\sin B \cos B \sin L}{W} + x_4 \frac{\sin B \cos B \cos L}{W} + x_5 \frac{1 - f^2 \sin^2 B}{W} + x_6 \frac{\sin^2 B}{W}, \quad (8)$$

де  $\Delta B, \Delta L$  - прирости широти і довготи відносно центру ділянки;  $W = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}$ .

У якості тестового об'єкту дослідження було обрано ГНСС-мережу з двадцяти пунктів (рис. 5), що була створена для будівництва та подальшого моніторингу транспортного тунелю загальною довжиною 25 км. За розглянутою методикою було обчислено модельні значення висот геоїда для всіх пунктів мережі за моделлю EGM2008. Використовуючи відомі із геометричного нівелювання ортометричні висоти для десяти пунктів мережі, було побудовано карту висот геоїда (рис. 6).

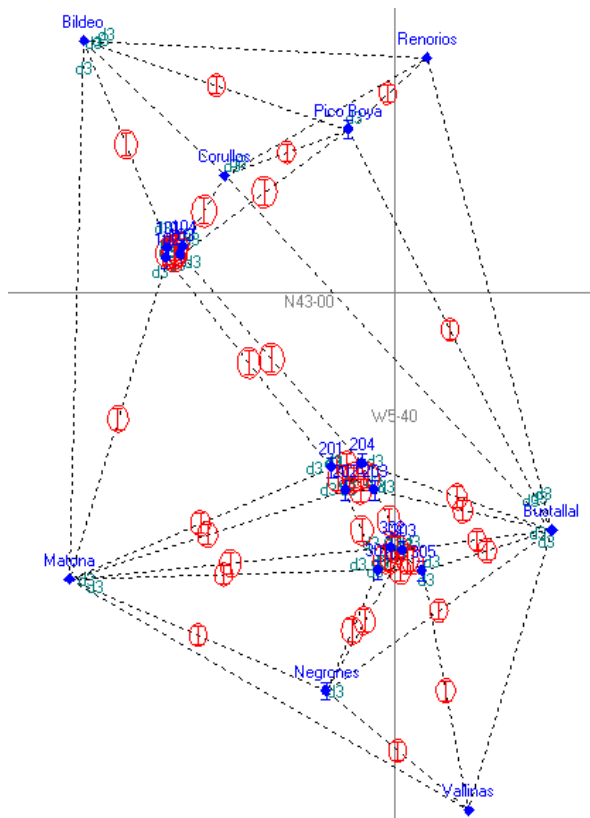


Рис. 5. Схема досліджуваної мережі

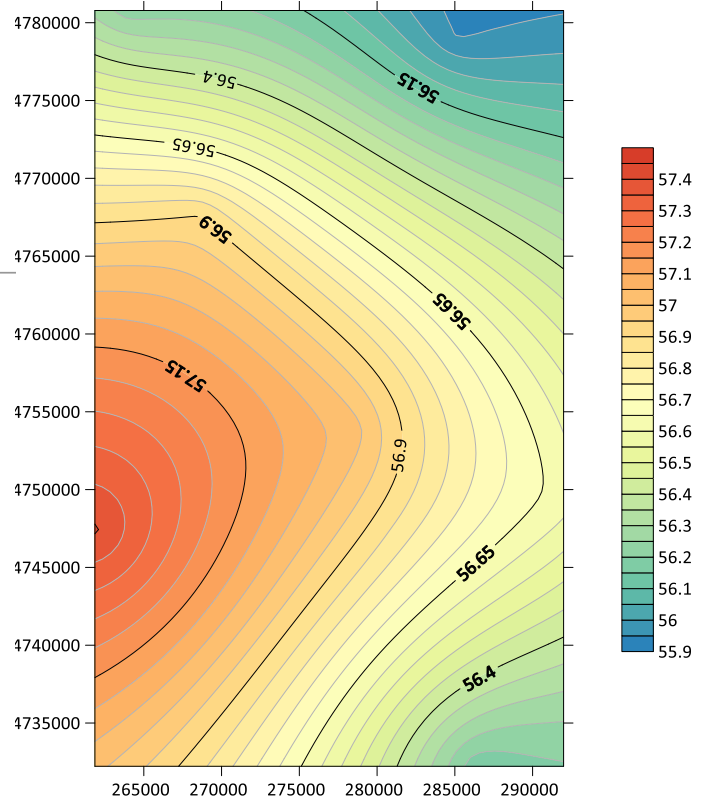


Рис. 6. Карта висот геоїда

Використовуючи моделі 1-5 (4)-(8) було побудовано уточнену модель локального геоїда на ділянку моніторингу. Оцінювання точності виконувалось за відхиленнями на десяти пунктах мережі, висоти яких не використовувались для уточнення моделі геоїда. Результати оцінювання точності наведено в табл. 4.

Таблиця 4

#### Оцінювання точності апроксимації поверхні локального геоїда

Модель	СКП апроксимації, м	СКП відхилень висот геоїда, м
1	0.323	0.313
2	0.032	0.049
3	0.165	0.035
4	0.080	0.036
5	0.036	0.049
Kriging інтерполяція	-	0.025
Мінімальна кривина	-	0,034
RBF	-	0.024

Приклад поверхні локального геоїда, побудованої за моделлю (8) наведено на рис. 7. В результаті аналізу встановлено, що для моделей (4), (6), (7), точність побудови математичної моделі локального геоїда є невисокою, що пов'язано із невдалим розподілом точок із відомими висотами на ділянці моніторингу. Рекомендується за таких несприятливих умов використовувати поліноміальні моделі типу (5) та (8) або звичайні інтерполяційні методи, які дозволяють отримати задовільну точність.



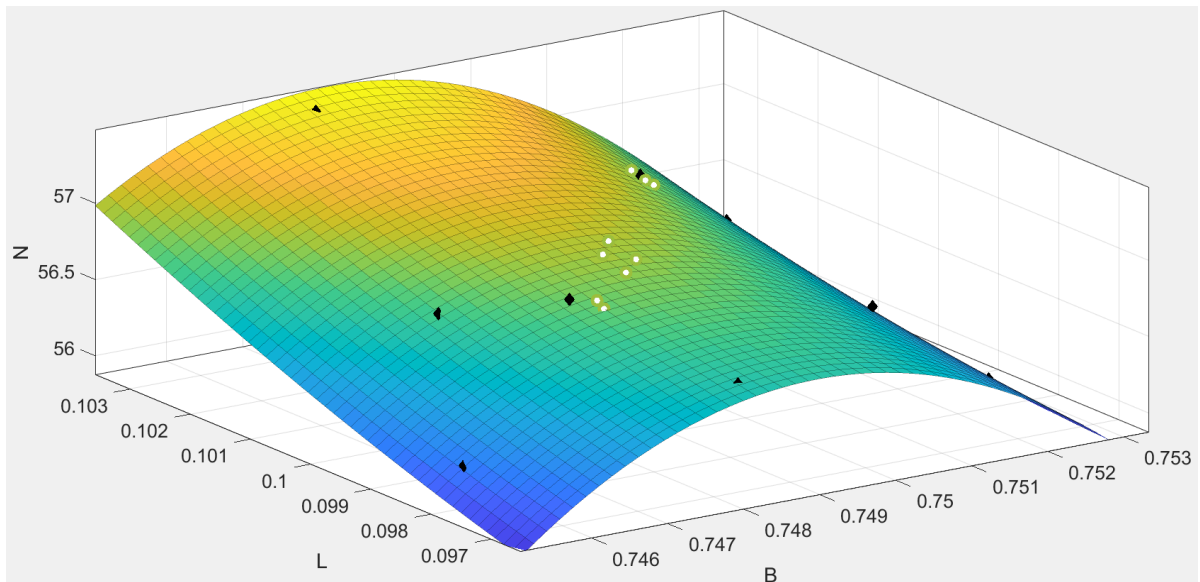


Рис. 7. Просторове зображення поверхні локального геоїда для Моделі 5

Для сумісного опрацювання ГНСС-вимірювань та наземних вимірювань у результаті останніх необхідно ввести поправки за відхилення прямовисних ліній. Врахування відхилень прямовисних ліній рекомендується виконувати із використанням глобальних моделей геоїда: XGM2019e, SGG-UGM-1, EIGEN-6C4, EGM2008.

Для ГНСС-мережі, що наведена на рис. 5 було виконано дослідження точності інтерполяції відхилень прямовисних ліній для десяти пунктів в яких відхилення були відомі. Карти зміни відхилень прямовисних ліній наведено на рис. 8.

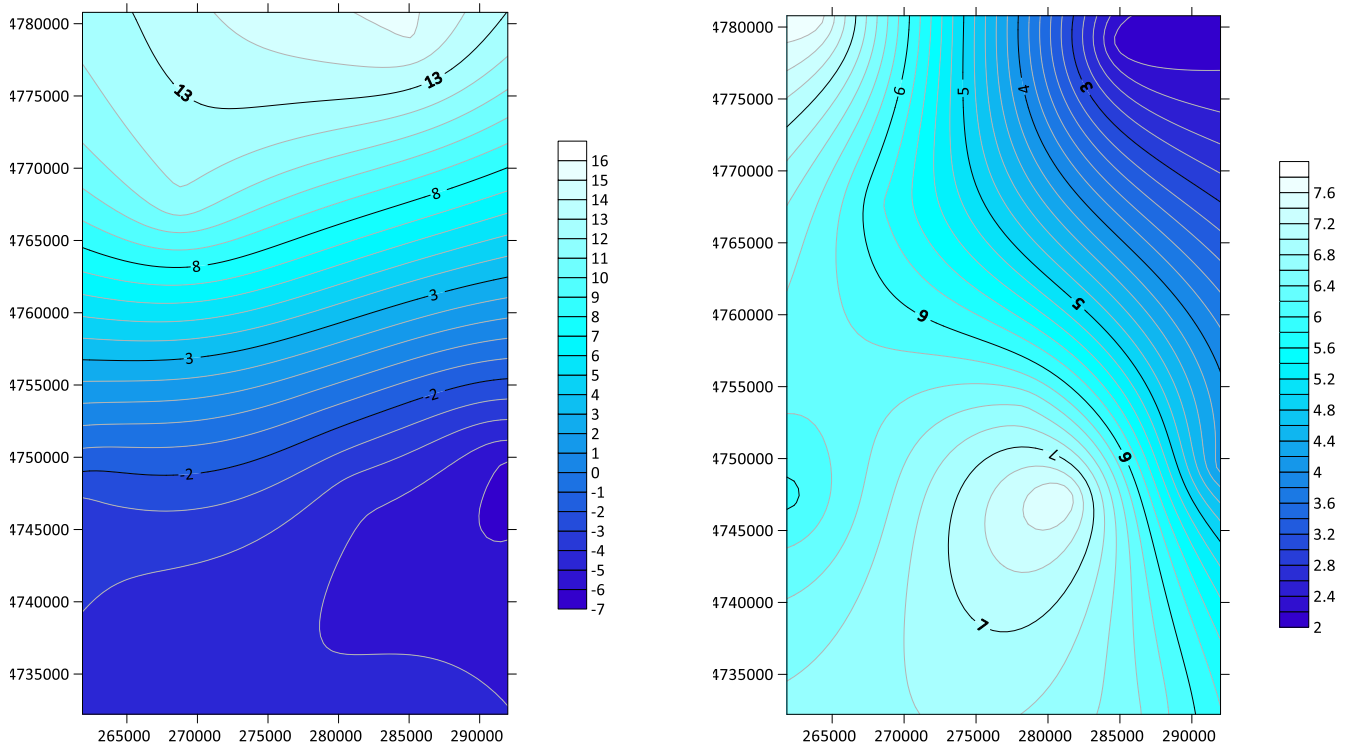


Рис. 8. Карти зміни відхилень прямовисних ліній у напрямку Північ-Південь та Захід-Схід

Оцінювання точності виконувалось за відхиленнями на десяти пунктах мережі, відхилення яких не використовувались для інтерполяції.

Таблиця 5

### Оцінювання точності інтерполяції відхилень прямовисних ліній

Модель інтерполяції	СКП у напрямку Північ-Південь, сек	СКП у напрямку Захід-Схід, сек
Kriging інтерполяція	0.96	1.40
RBF	0.50	1.22

Отримані результати дають змогу стверджувати, що точність інтерполяції відхилень прямовисних ліній є достатньою для виконання геодезичного моніторингу при комбінуванні ГНСС-спостережень та наземних спостережень.

У розділі 3 «Теоретичні основи створення високоточних геодезичних мереж методами ГНСС-технологій для вирішення задач геодезичного моніторингу» досліджено питання статистичного моделювання точності ГНСС-мереж з використанням різних моделей похибок базових ліній, виконано дослідження точності ГНСС-мереж для спостереження за інженерними спорудами та удосконалено методику контролю стабільності пунктів ГНСС-мереж. Експериментальні дослідження виконувались на території двох атомних електростанцій.

Проведено дослідження точності ГНСС-мереж методом статистичного моделювання, використовуючи співвідношення, що лежить в основі методу статистичних випробувань:

$$P \left\{ \left| \left( \sum_1^n \xi_i / n \right) - x \right| \leq \left( 3\sigma / \sqrt{n} \right) \right\} = 0.997, \quad (9)$$

де,  $\xi_i$  - середнє арифметичне з випадкових величин;  $n$  – кількість статистичних випробувань,  $n \rightarrow \infty$ .

Для кожного пункту отримано  $n$  наборів координат ( $X, Y, Z$ ), які порівняно із безпомилковими координатами і обчислено істинні та середні квадратичні похибки координат:

$$\delta X_j = X_j - X_0; \delta Y_j = Y_j - Y_0; \delta Z_j = Z_j - Z_0; \quad (10)$$

$$m_X^2 = \sum_1^n \delta X_j^2 / n; m_Y^2 = \sum_1^n \delta Y_j^2 / n; m_Z^2 = \sum_1^n \delta Z_j^2 / n; \quad (11)$$

Систематизовано підходи до моделювання точності ГНСС-мереж (рис. 9).

Відповідно до наведених на рис. 9 моделей коректним є застосування строгої моделі. При виконанні моніторингу необхідно врахувати наступні особливості:

- при виконанні моніторингу за допомогою однієї пари приймачів різниця між строгою та змішаною моделями відсутня;
- при виконанні постійного моніторингу на всіх пунктах одночасно, немає необхідності у вирішенні таких проблем, як уточнення супутникових орбіт або параметрів обертання Землі, тощо;
- навіть найбільш досконала модель точності вимірювання псевдовіддалей (фази несучої) не гарантує якісного результату;

- за дослідженнями С. Rizos, практично можливо виконувати опрацювання ГНСС-мереж побазовим методом без втрати точності, якщо виконувати масштабування коваріаційних матриць окремих базових ліній на величину  $R/2$ , де  $R$  – кількість ГНСС-приймачів у мережі. За таких умов цілком реально виконати якісне моделювання ГНСС-мережі за спрощеною моделлю.

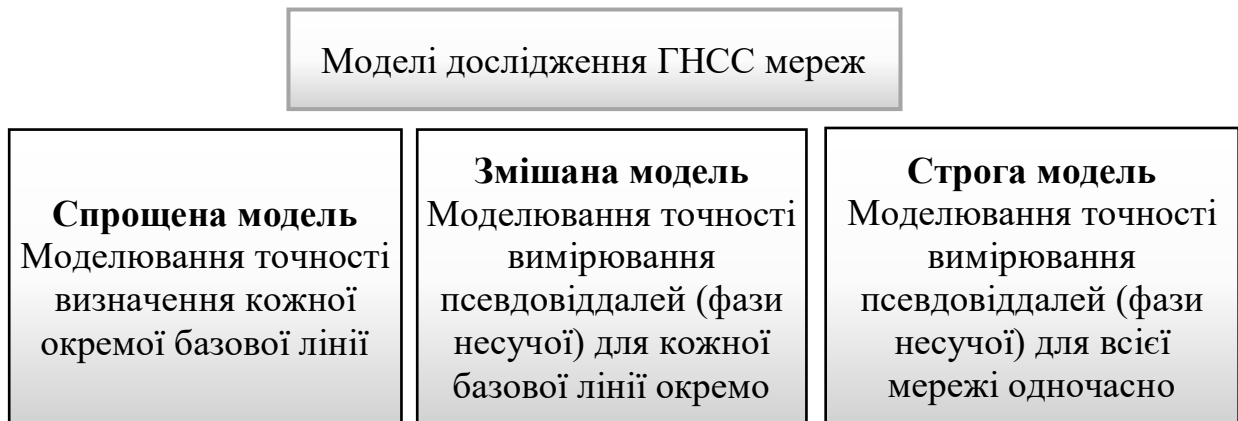


Рис. 9. Підходи до моделювання ГНСС-мереж

Розроблено методикау моделювання та відповідну технологію проведення статистичних випробувань (рис. 10).

Базуючись на запропонованій стратегії дослідження було розроблено комплекс програм-функцій у програмному середовищі MATLAB, які дозволяють в інтерактивному режимі завантажувати файл виміряних базових ліній та наближених координат пунктів, вводити кількість приймачів та кількість статистичних випробувань.

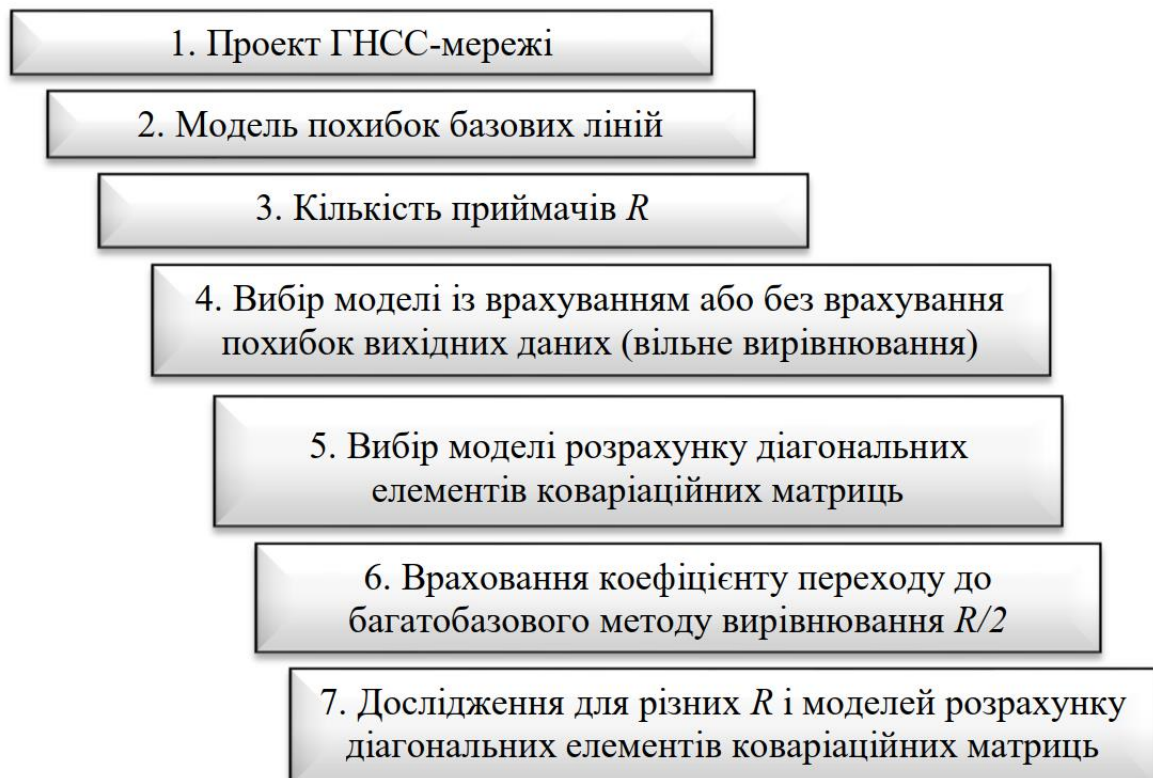


Рис. 10. Технологічна схема статистичних випробувань ГНСС-мереж

Виконано аналіз існуючих підходів до розрахунку коваріаційних матриць ГНСС-мереж (рис. 11).

Виконано аналіз, дослідження та запропоновано власні моделі визначення діагональних елементів коваріаційних матриць:

**Модель 1.** Значення СКП приймають за результатами вирівнювання  $m_{\Delta X}, m_{\Delta Y}, m_{\Delta Z}$ .

**Модель 2.** Значення  $a_X = \sqrt{c_X^2 + m_{\Delta X}^2}$  і  $a_Y = \sqrt{c_Y^2 + m_{\Delta Y}^2}$  описують сумарний вплив похибки центрування на пункті та  $m_{\Delta X}, m_{\Delta Y}$ ;  $a_Z = \sqrt{c_Z^2 + m_{\Delta Z}^2}$  описує сумарний вплив похибки вимірювання висоти антени на пункті та  $m_{\Delta Z}$ :

$$m_n = a_X; \quad m_e = a_Y; \quad m_h = a_Z. \quad (12)$$

**Модель 3.** Значення СКП беруть з паспортних даних на апаратуру ГНСС:

$$m_n = m_e = \frac{a + b \cdot D}{\sqrt{2}}; \quad m_h = c + d \cdot D. \quad (13)$$

**Модель 4.** Значення  $a_X, a_Y, a_Z$  приймають рівними  $m_{\Delta X}, m_{\Delta Y}, m_{\Delta Z}$  за результатами вирівнювання і додають значення  $b, d$ , що пов'язані з довжиною базової лінії та призначаються пропорційно компонентам базової лінії:

$$m_n = \sqrt{a_X^2 + (b \cdot \Delta X)^2}; \quad m_e = \sqrt{a_Y^2 + (b \cdot \Delta Y)^2}; \quad m_h = \sqrt{a_Z^2 + (d \cdot \Delta Z)^2}. \quad (14)$$

**Модель 5.** Значення  $a_X, a_Y, a_Z$  приймають рівним  $m_{\Delta X}, m_{\Delta Y}, m_{\Delta Z}$  за результатами вирівнювання і додають значення  $b, d$ , що вважається пов'язаною з довжиною базової лінії та призначається у відповідності до точності визначення компонентів базової лінії:

$$m_n = \sqrt{a_X^2 + \left( b \cdot \frac{m_{\Delta X}}{m_D} D \right)^2}; \quad m_e = \sqrt{a_Y^2 + \left( b \cdot \frac{m_{\Delta Y}}{m_D} D \right)^2}; \quad m_h = \sqrt{a_Z^2 + \left( d \cdot \frac{m_{\Delta Z}}{m_D} D \right)^2}, \quad (15)$$

де  $m_{\Delta X}, m_{\Delta Y}, m_{\Delta Z}$  - СКП визначення компоненти базової лінії;  
 $m_D = \sqrt{m_{\Delta X}^2 + m_{\Delta Y}^2 + m_{\Delta Z}^2}$ .

**Модель 6.** Значення  $a_X, a_Y, a_Z$  беруть з паспортних даних на апаратуру.

**Модель 7.** Значення  $a_X, a_Y, a_Z$  беруть з паспортних даних на апаратуру ГНСС і додають значення  $b, d$ , що вважається пов'язаною з довжиною базової лінії та призначається у відповідності до паспортної точності визначення компонентів базової лінії:

$$m_n' = a_X + b \frac{m_n}{m_d} D; \quad m_e' = a_Y + b \frac{m_e}{m_d} D; \quad m_h' = a_Z + d \frac{m_h}{m_d} D. \quad (16)$$

де  $m_d = \sqrt{m_n^2 + m_e^2 + m_h^2}$ .

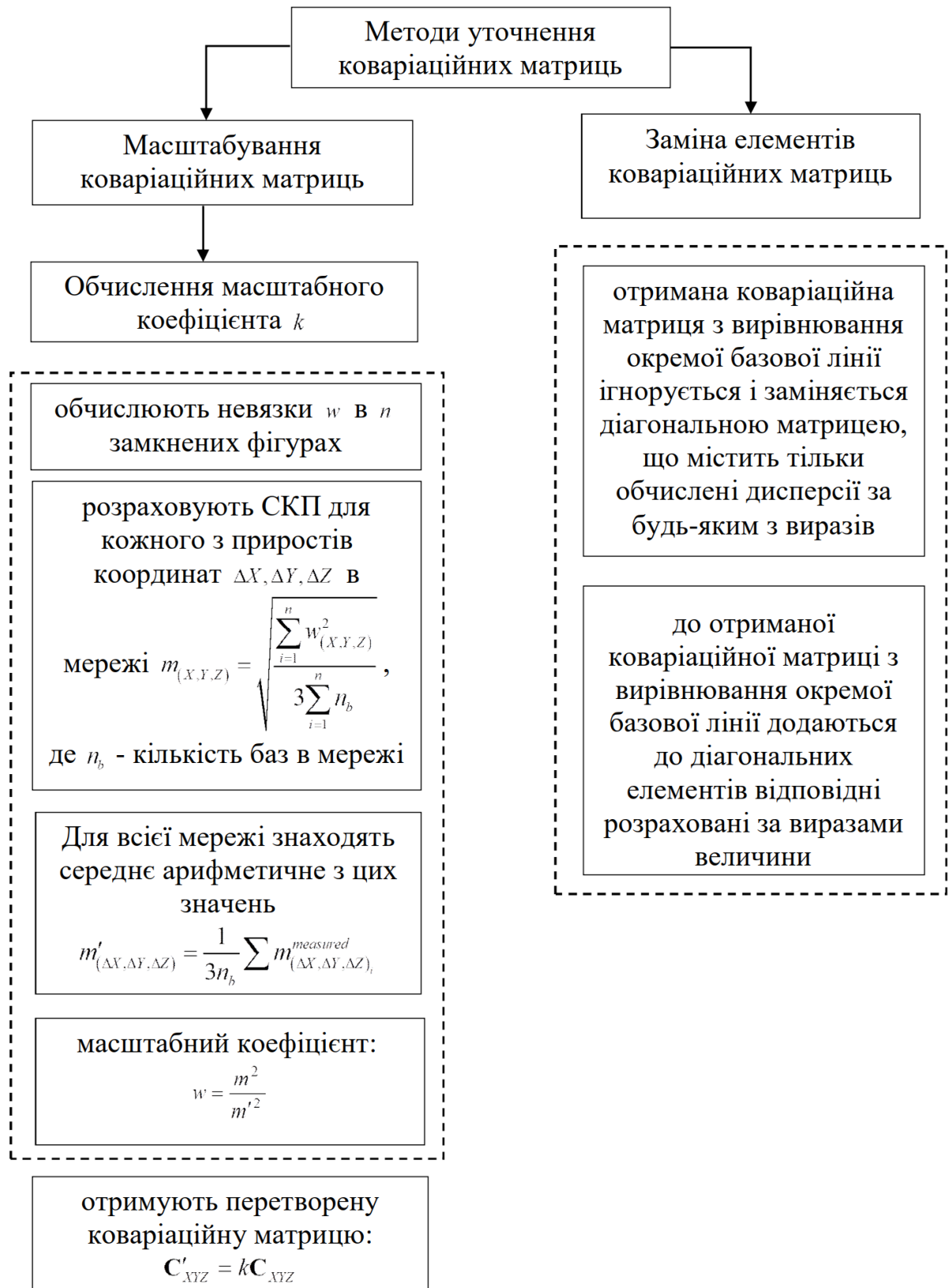


Рис. 11. Методи розрахунку коваріаційних матриць

Перевірку достовірності запропонованих моделей розрахунку СКП базових ліній ГНСС-мереж було досліджено на прикладі двох ГНСС-мереж побудованих для спостереження за деформаціями інженерних споруд двох атомних електростанцій (рис. 12).

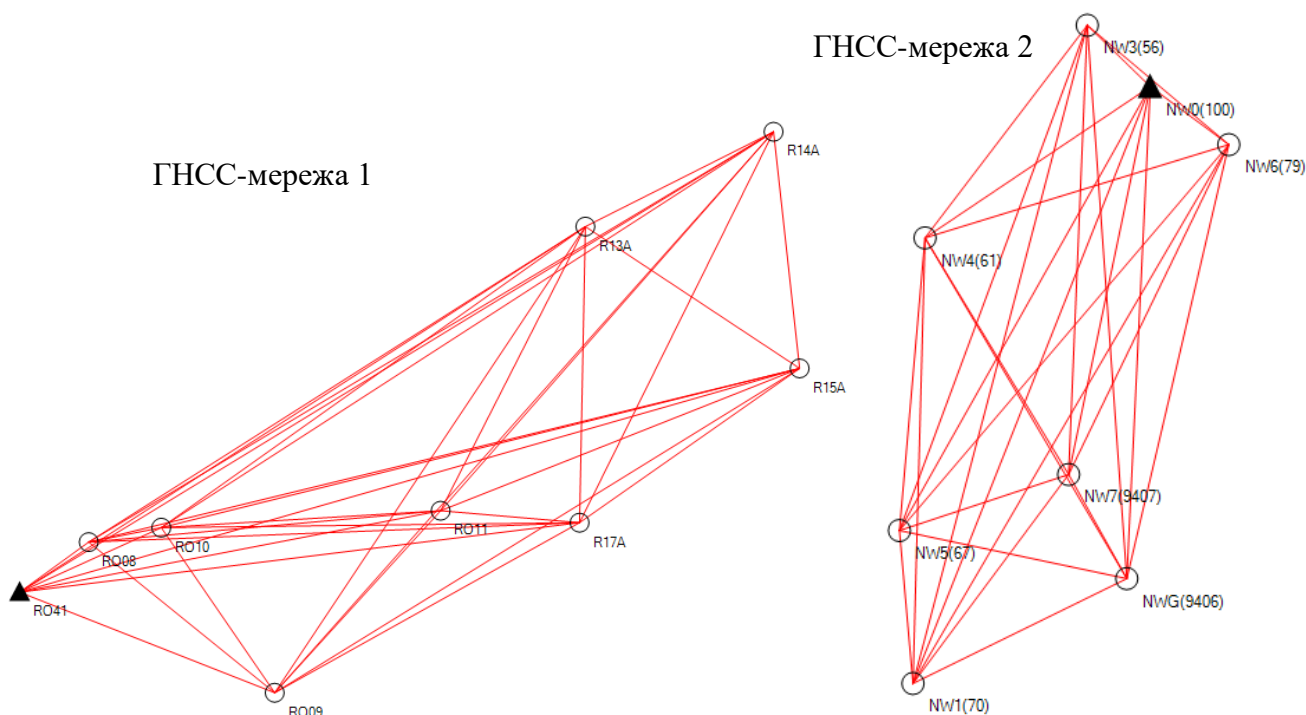


Рис. 12. Схема тестових деформаційної ГНСС-мереж

Результати статистичного моделювання точності за моделлю 2 наведено на рис. 13, за моделлю 1 наведено на рис. 14. Загалом було виконано 10000 статистичних випробувань для кожної моделі. Результати виконаного дослідження зведено до табл. 6. За результатами табл. 6 можна зробити висновок, що найкращих результатів дозволяє досягти Модель 5. Саме цю модель рекомендується використовувати при вирівнюванні ГНСС-мереж та опрацюванні даних моніторингу.

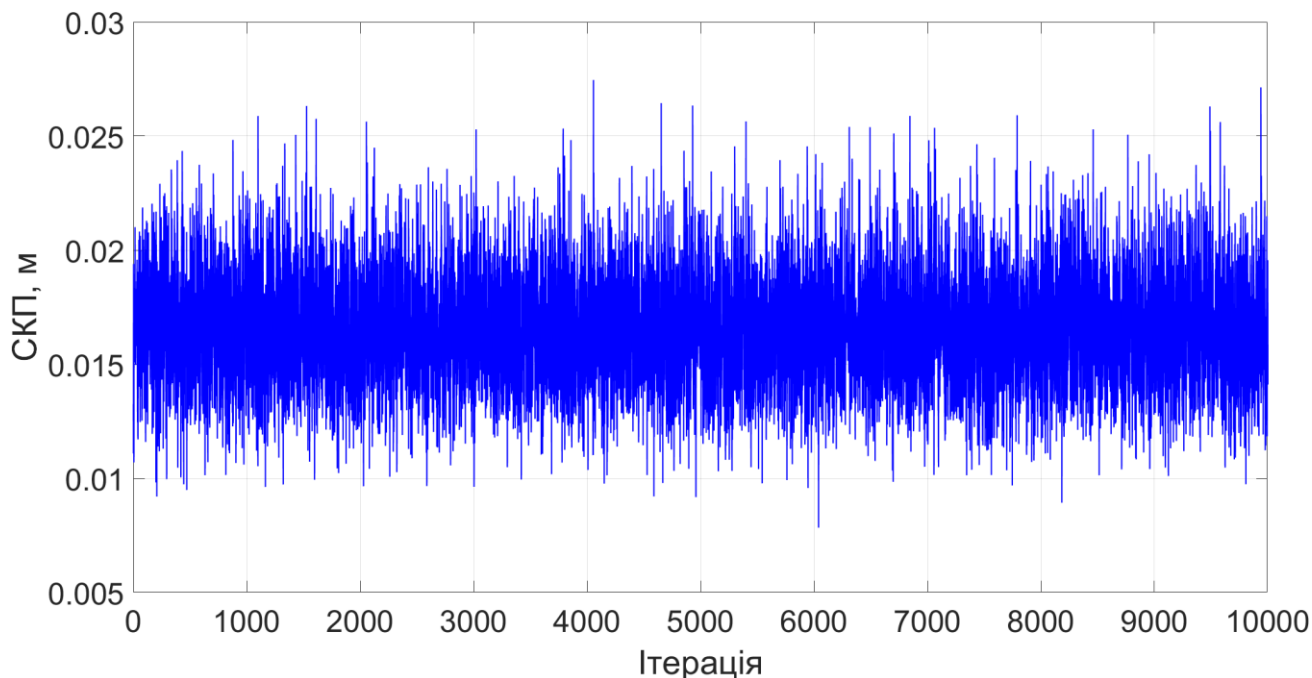


Рис. 13. Середні квадратичні похибки визначення просторового місцеположення за результатами статистичного моделювання (ГНСС-мережа 1)

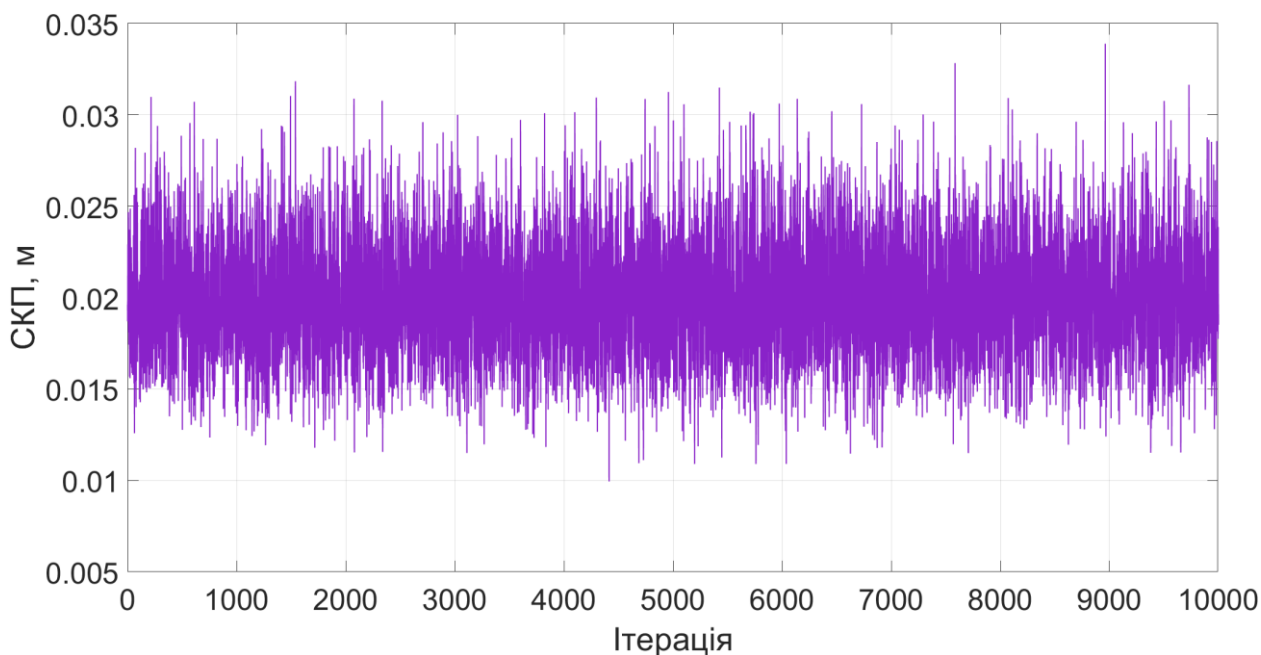


Рис. 14. Середні квадратичні похибки визначення просторового місцеположення за результатами статистичного моделювання (ГНСС-мережа 2)

Таблиця 6

**Результати статистичного моделювання для двох типів ГНСС-мереж**

Модель	ГНСС-мережа 1			ГНСС-мережа 2		
	Макс, м	Мін, м	СКП, м	Макс, м	Мін, м	СКП, м
1	0,086	0,026	0,043	0,077	0,012	0,035
2	0,052	0,017	0,030	0,042	0,009	0,023
3	0,046	0,015	0,027	0,038	0,007	0,018
4	0,056	0,019	0,032	0,047	0,010	0,023
5	0,042	0,012	0,022	0,033	0,004	0,013
6	0,078	0,025	0,037	0,070	0,017	0,029
7	0,070	0,0238	0,034	0,061	0,013	0,025

Удосконалено математичну модель та методику дослідження стабільності пунктів ГНСС-мережі та ідентифікації переміщень пунктів мережі. Запропоновану модель було досліджено на прикладі ГНСС-мережі, створеної для моніторингу інженерних споруд атомних електростанцій.

При виконанні геодезичного моніторингу висувається гіпотеза про те, що результатом несумісності точок деформаційної мережі можуть бути саме переміщення точок у часі. Для оцінювання можливих переміщень точок  $\mathbf{B}_1, \dots, \mathbf{B}_p$  на епоху  $t'$ , використовують виміряні величини  $\mathbf{L}$ ;  $\mathbf{L}'$  та оцінки координат точок  $\mathbf{C}$ ;  $\mathbf{C}'$ . За таких умов різниці виміряних величин  $d\mathbf{L} = \mathbf{L}' - \mathbf{L}$  та координат  $d\mathbf{C} = \mathbf{C}' - \mathbf{C}$  будуть представляти випадкові величини у межах довірчих інтервалів точності вимірювань. Якщо точка  $\mathbf{B}_i$  зазнала переміщення за період часу  $t' - t$  відповідні

різниці будуть мати не випадкові значення, що не кореспондуються із точністю вимірювань.

Зв'язок між різницями вимірних величин та різницями у координатах можна представити як:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{C} &= \mathbf{C}^0 + (\mathbf{A}^T \mathbf{K}_L^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{K}_L^{-1} (\mathbf{L} - \mathbf{L}^0); \\ \hat{\mathbf{C}} &= \mathbf{C}^0 + (\mathbf{A}^T \mathbf{K}_{\hat{L}}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{K}_{\hat{L}}^{-1} (\hat{\mathbf{L}} - \mathbf{L}^0); \\ \Delta \mathbf{C} &= \hat{\mathbf{C}} - \mathbf{C}; \mathbf{K}_{\Delta \mathbf{C}} = \mathbf{K}_{\hat{\mathbf{C}}} + \mathbf{K}_{\mathbf{C}}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

де  $\mathbf{C}$ ;  $\hat{\mathbf{C}}$  - координати точок на епохи  $t$  та  $t'$ ;  $\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{C}}}$ ;  $\mathbf{K}_{\mathbf{C}}$  - коваріаційні матриці координат точок у двох епохах;  $\mathbf{L}$ ;  $\hat{\mathbf{L}}$  - виміряні базові лінії;  $\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{L}}}$ ;  $\mathbf{K}_{\mathbf{L}}$  - коваріаційні матриці похибок вимірних базових ліній, розраховані за моделями 1-7.

Наступним кроком розраховують квадратичні форми поправок вимірних величин, квадратичні форми різниць координат, глобальну  $\mathbf{R}$  та окремої точки  $\mathbf{R}_i$  і узагальнену середню квадратичну похибку одиниці ваги для двох епох спостережень. Статистична перевірка розпочинається із глобального  $\mathbf{F}$ -тесту для всієї мережі. На другому етапі аналізу, проводять локальний тест, для локалізації точок, що отримали переміщення. Алгоритм перевірки виконується для кожної точки мережі. Для перевірки запропонованої методики виконано статистичну перевірку геодезичної деформаційної ГНСС-мережі 2 для дослідження деформацій інженерних споруд АЕС.

За виразами (17) та моделлю похибок базових ліній (14) було розраховано показники стабільності мережі та оцінено можливі просторові переміщення пунктів. Результати аналізу наведено у табл. 7.

Таблиця 7

## Аналіз стабільності пунктів ГНСС-мережі

Реперний знак мереж	Епоха 1 - 2	Епоха 2 - 3	Величина зміщення у просторі
№9406	Стабільний	Стабільний	0,003
№ 70	Стабільний	Втрата стабільності	<b>-0,008</b>
№100	Стабільний	Стабільний	0,003
№56	Стабільний	Стабільний	0,005
№61	Стабільний	Втрата стабільності	<b>-0,011</b>
№67	Стабільний	Стабільний	-0,001
№79	Стабільний	Стабільний	0,006
№9407	Стабільний	Стабільний	0,004

Таким чином два пункти №70 та №61 надійно ідентифікуються, як такі, що змістилися між епохами спостережень 2 та 3.

Розроблені у розділі моделі та методики статистичного моделювання точності та перевірки стабільності ГНСС-мереж дозволяють надійно здійснювати проектування та контроль мереж для геодезичного моніторингу.



У розділі 4 «ГНСС моніторинг територій зведення та експлуатації інженерних споруд» розглянуто завдання ГНСС моніторингу територій зведення та експлуатації інженерних споруд, розроблено методику аналізу напружено-деформованого стану при плоских деформаціях за результатами ГНСС-спостережень. Запропоновано та апробовано методику аналізу просторових деформацій на базі методу скінченних елементів. За даними ГНСС-моніторингу виконано дослідження просторових деформацій територій експлуатації об'єктів енергетики та спортивних споруд.

При проектуванні споруд необхідно враховувати всі фактори ризику, що можуть призвести до аварії інженерної споруди. Одним з таких факторів є вплив геодинамічних процесів локального, регіонального та навіть глобального характеру.

Наведено методику аналізу плоских деформацій зони розміщення інженерної споруди за результатами ГНСС-моніторингу. Для отримання і аналізу двовимірної моделі напружено-деформованого стану зроблено наступні припущення:

- деформація вважається плоскою в горизонтальній площині;
- вертикальні швидкості не мають суттєвого впливу на результати аналізу;
- деформація є однорідною і рівномірно розподіленою в середині трикутника, що утворений ГНСС станціями.

Повна матриця рівняння для деформації задається початковим місцеположенням  $(x_o, y_o)$  та компонентами швидкості  $(v_x, v_y)$ :

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} - \Omega \\ \varepsilon_{xy} + \Omega & \varepsilon_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}, \quad (18)$$

де  $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}$  - компоненти тензору нескінченномалої зміни деформації;  $\Omega$  - компоненти матриці швидкості обертання, яка є асиметричною;  $t_x, t_y$  - компоненти зміщення на площині.

За результатами ГНСС-вимірювань можна отримати горизонтальні швидкості  $(v_x, v_y)$  для трьох пунктів. Отже маємо шість рівнянь з шістьма невідомими, які у матричній формі можна представити як:

$$\mathbf{d} = \mathbf{G} \mathbf{m}, \quad (19)$$

де  $\mathbf{d}$  - матриця відомих компонентів швидкості для трьох станцій,  $\mathbf{m}$  - матриця невідомих,  $\mathbf{G}$  - матриця коефіцієнтів, що пов'язують  $\mathbf{d}$  та  $\mathbf{m}$ . У розгорнутій формі (19) має вигляд:

$$\begin{bmatrix} {}^1v_x \\ {}^1v_y \\ {}^2v_x \\ {}^2v_y \\ {}^3v_x \\ {}^3v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -{}^1y_o & {}^1x_o & {}^1y_o & 0 \\ 0 & 1 & {}^1x_o & 0 & {}^1x_o & {}^1y_o \\ 1 & 0 & -{}^2y_o & {}^2x_o & {}^2y_o & 0 \\ 0 & 1 & {}^2x_o & 0 & {}^2x_o & {}^2y_o \\ 1 & 0 & -{}^3y_o & {}^3x_o & {}^3y_o & 0 \\ 0 & 1 & {}^3x_o & 0 & {}^3x_o & {}^3y_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ \Omega \\ \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yy} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Похибка оцінювання деформації є функцією похибок оцінювання швидкостей за допомогою ГНСС. Похибки оцінювання швидкості у найпростішому варіанті можна представити через коваріаційну матрицю  $\mathbf{K}_d$ , діагональні елементи якої відповідають СКП визначення швидкості. Доцільно прийняти, що оцінки швидкості, які отримані незалежно одна від одної, тобто всі недиагональні елементи матриці  $\mathbf{K}_d$  дорівнюють нулю. Коваріаційна матриця оцінювання точності параметрів деформації має вигляд:

$$\mathbf{K}_m = (\mathbf{G}^T (\mathbf{K}_d^{-1}) \mathbf{G})^{-1}, \quad (21)$$

де  $\mathbf{K}_d^{-1} = \text{diag}(1/1 m_{v_x}^2 \quad 1/1 m_{v_y}^2 \quad 1/2 m_{v_x}^2 \quad 1/2 m_{v_y}^2 \quad 1/3 m_{v_x}^2 \quad 1/3 m_{v_y}^2)$ .

Виконано дослідження напружено-деформованого стану зони розміщення стадіону «Донбас-Арена» за результатами ГНСС-моніторингу. Зведення та експлуатація спортивного комплексу «Донбас-Арена» виконувалися у складних геотехнічних умовах (підроблення територій, тектонічні рухи, щільна забудова). З метою постійного контролю за станом споруди у 2012 році було організовано систему постійного геодезичного моніторингу за спорудою та оточуючою територією. На першому етапі було створено лінійно-кутову геодезичну мережу із точністю визначення планових координат пунктів у межах 2-4 мм за кожною з координатних осей. У 2013 році, з метою вдосконалення системи моніторингу було прийнято рішення про додаткове включення в систему геодезичного моніторингу незалежних ГНСС-спостережень. Створена ГНСС-мережа базується на пунктах лінійно-кутової мережі і може бути використана безпосередньо для порівняння із попередніми результатами. Схему створеної ГНСС-мережі наведено на рис. 15.

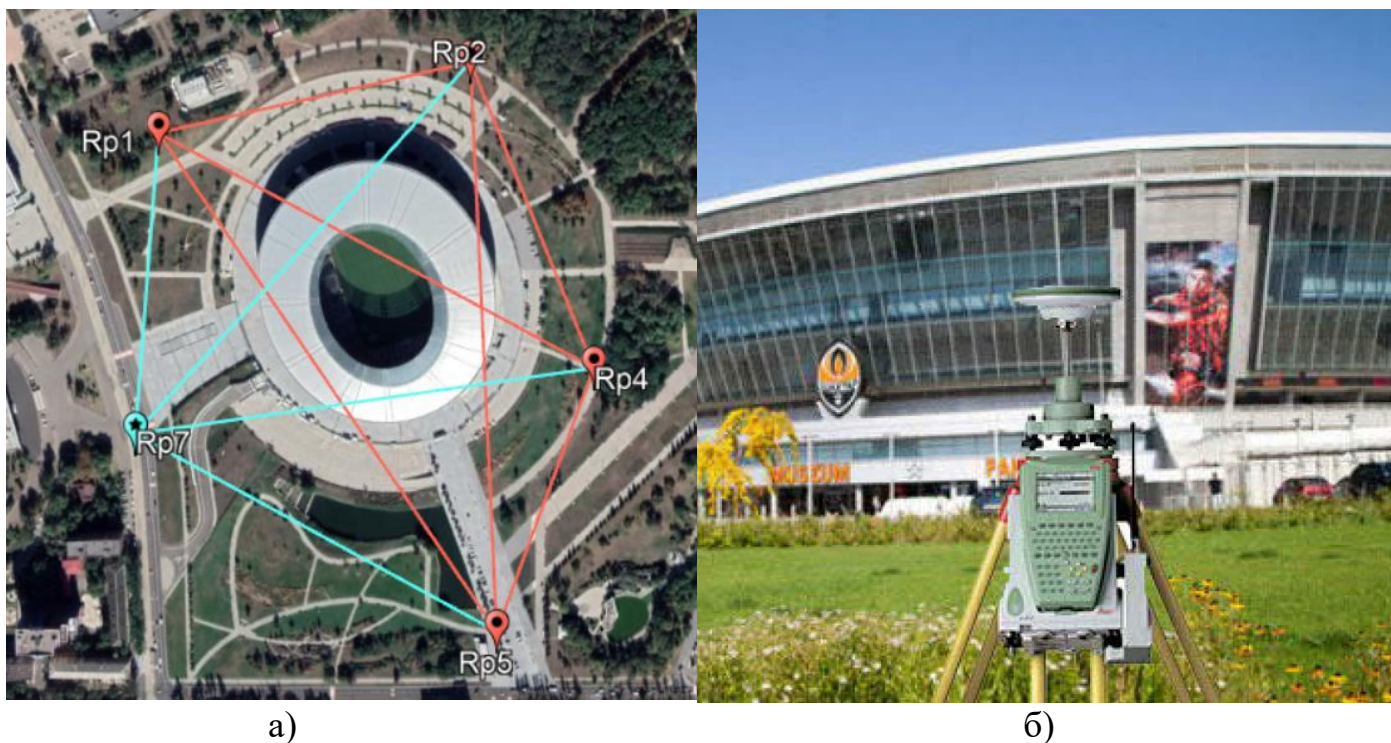


Рис. 15. ГНСС-мережа стадіону «Донбас Арена»  
 а) схема ГНСС-мережі;      б) пункт мережі Rp4 з ГНСС-приймачем

Вимірювання виконувались парою ГНСС-приймачів Leica System 1200. Оброблення окремих базових ліній виконувалося в програмі Leica LGO, отримані базові лінії вирівнювалися в програмі GeoLab. Отримана точність ГНСС-мережі відповідає точності лінійно-кутової мережі. За результатами спостережень 2012 року та ГНСС вимірів 2013 року було отримано переміщення для пунктів мережі, які наведено у табл. 8.

Таблиця 8

Переміщення пунктів 2012-2013 рр

Пункт	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м
Rp1	0,000	0,009
Rp2	0,014	0,004
Rp4	0,010	0,000
Rp5	0,007	-0,009
Rp7	0,010	-0,015

На початковому етапі аналізу напружено-деформованого стану було виконано розбиття ГНСС-мережі на трикутники. Розбиття виконано за допомогою триангуляції Делоне. Результати триангулювання пунктів мережі на трикутники оптимальної форми наведено на рис. 16.

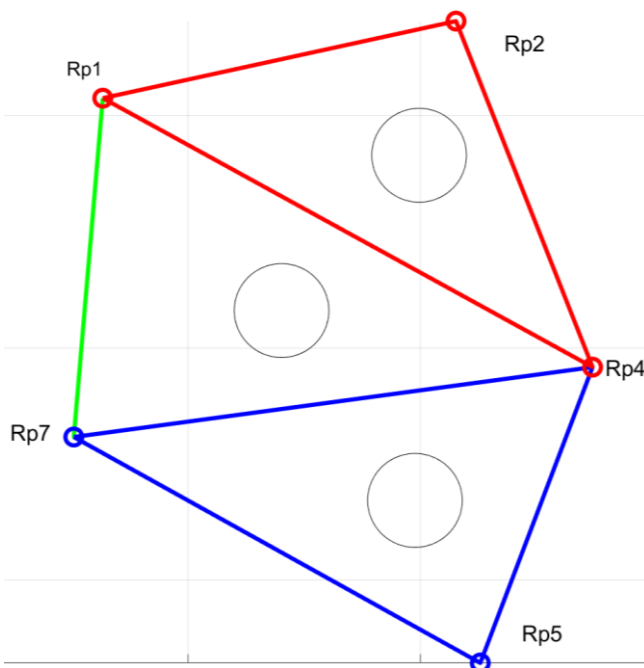


Рис. 16. Розбиття ГНСС-мережі на трикутники

Для кожного трикутника було розраховано вектор зміщення, розворот, напрямок розвороту, максимальне та мінімальне розширення та їх азимуті, максимальна деформація зсуву та деформацію площі. Для зміщення та розвороту додатково виконано оцінювання точності. Для кожного трикутника було побудовано ідеальне коло одиничного радіусу та деформоване коло за обчисленими параметрами деформації (рис. 17).

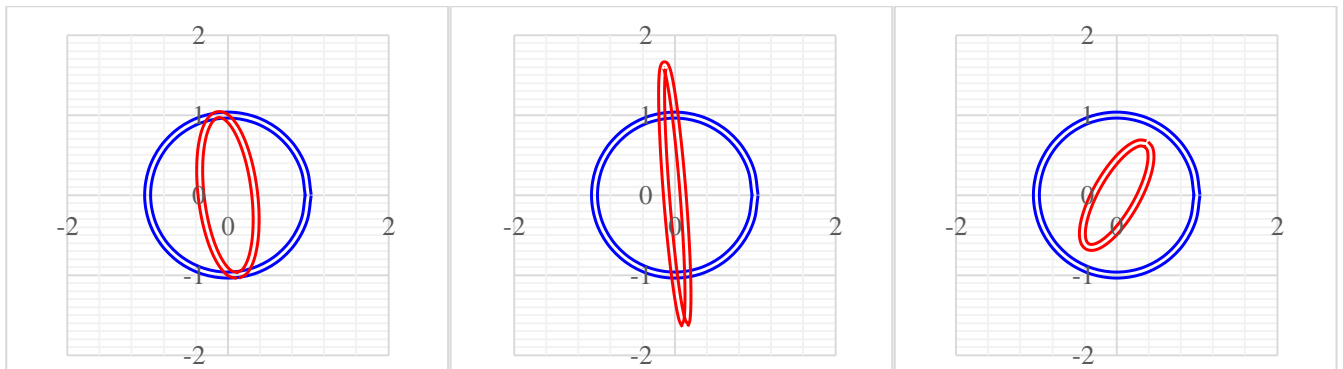


Рис. 17. Еліпси деформації трикутників: Rp1-Rp2-Rp4; Rp1-Rp4-Rp7; Rp4-Rp5-Rp7.

Встановлено, що у кожному з трикутників розворот визначається з низькою точністю, що пов'язане з практичною відсутністю деформації розвороту, яка знаходиться у межах декількох секунд. Основними типами деформації є стиснення або розтяг. У трикутниках Rp1-Rp2-Rp4 та Rp1-Rp4-Rp7 чітко вираженими є деформації розтягу в обох напрямках, у трикутнику Rp4-Rp5-Rp7 спостерігається деформація розтягу вздовж великої півосі та стиснення вздовж малої півосі.

Для дослідження просторових деформацій земної поверхні в зоні зведення та експлуатації інженерних споруд рекомендовано використовувати метод скінченних елементів. У випадку просторової ГНСС мережі запропоновано використовувати наступне рівняння, що пов'язує виміряні переміщення з параметрами деформаційного процесу:

$$\mathbf{u} = d\mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{t} \quad (22)$$

де  $\mathbf{u}$  - вектор вимірних переміщень;  $\mathbf{x}$  - вектор координат точок;  $\mathbf{t}$  - вектор зміщення,

$$d\mathbf{F} = \mathbf{T}_d + \mathbf{T}_r \quad (23)$$

градієнт переміщень, утворений симетричним тензором деформації  $\mathbf{T}_d$  та асиметричним тензором повороту  $\mathbf{T}_r$ .

Переміщення  $u_1, u_2, u_3$  вздовж координатних осей  $x, y, z$  представляють через наступні рівняння:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= e_{11}x + e_{12}y + e_{13}z + w_{13}z - w_{12}y + t_1; \\ u_2 &= e_{22}x + e_{12}y + e_{23}z + w_{12}x - w_{23}z + t_2; \\ u_3 &= e_{33}x + e_{13}y + e_{23}z + w_{23}y - w_{13}x + t_3, \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

де  $e_{ii}$  та  $e_{ij}$  компоненти тензора  $\mathbf{T}_d$ ;  $w_{ij}$  компоненти тензора  $\mathbf{T}_r$ .

Компоненти тензорів разом із зміщеннями  $t_i$  є невідомими і можуть бути визначені з вирішення системи рівнянь. Після визначення компонентів тензору (24), розраховують головні напрямки стиснення або розтягу, повну дилатацію, орієнтування головних осей чистої деформації. Головною перевагою застосування такого підходу до дослідження деформацій є незалежність наведених вище параметрів деформацій від системи координат.

Апробацію запропонованого підходу було виконано на прикладі деформаційної ГНСС-мережі побудованої для дослідження Нововоронезької АЕС (рис. 12, ГНСС-мережа 2). Побудову мережі було виконано у 1999 р. Спостереження було виконано

тричі з інтервалом в один рік. За виразами (22) – (24) було виконано дослідження визначених переміщень пунктів ГНСС-мережі методом скінченних елементів.

Результати моделювання переміщень та напружень наведено на рис. 18 та рис. 19. Найбільші коливання значення напружень спостерігаються для пунктів №61, №67, №70, які за результатами дослідження стабільності у третьому розділі зазнали суттєвих переміщень. Даний результат підтверджує ефективність застосування методу скінченних елементів при дослідженні деформацій території зведення та експлуатації інженерних споруд.

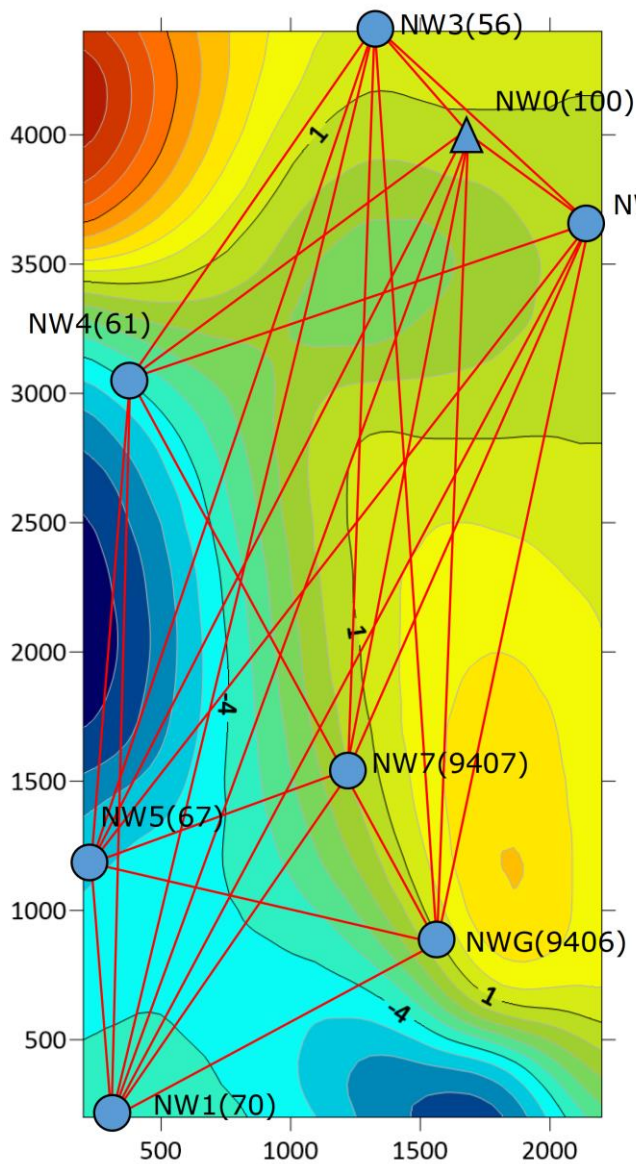


Рис. 18. Діаграма напружень

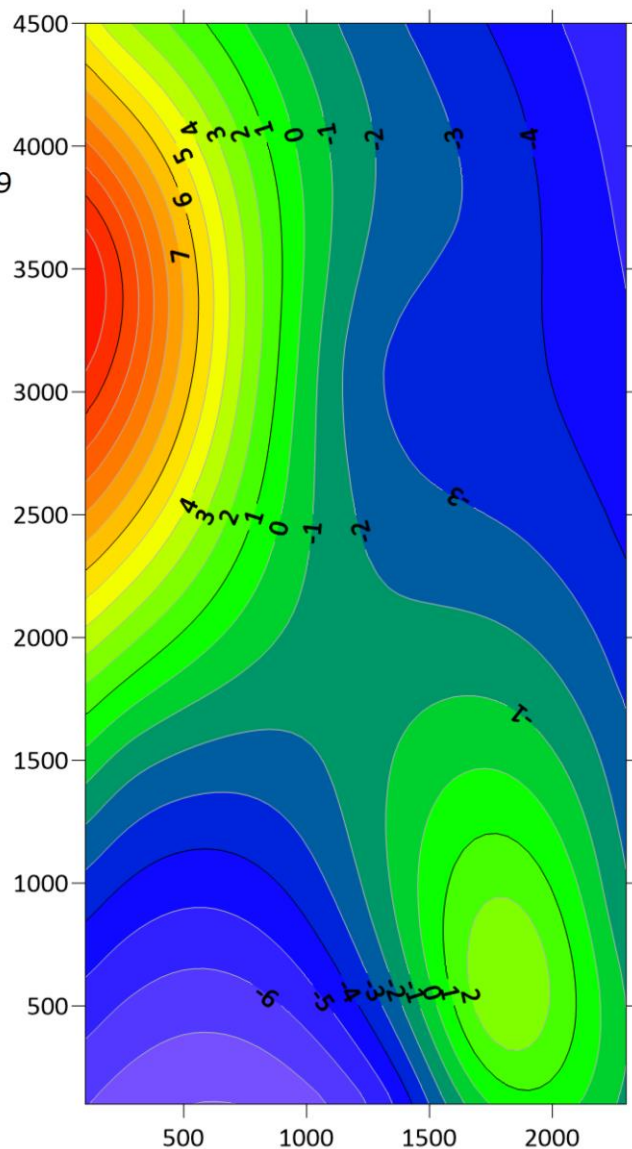


Рис. 19. Діаграма переміщень

У розділі 5 «Практика впровадження ГНСС-технологій у вирішення задач геодезичного моніторингу інженерних споруд» запропоновано узагальнену технологічну схему геодезичного моніторингу. Розроблено методику попереднього розрахунку точності моніторингу при виконанні геодезичного моніторингу методами ГНСС-спостережень з використанням методу Particle Swarm Optimization (PSO). Досліджено ефективність ГНСС-технологій для спостереження за зсувами в зоні будівництва та при спостереженнях за кренами висотних споруд. Розроблено та

досліджено математичну модель попереднього розрахунку точності моніторингу при комбінованому використанні ГНСС та електронних тахеометрів.

За результатами аналізу відомих технологічних схем ведення геодезичного моніторингу запропоновано узагальнену технологічну схему геодезичного моніторингу (рис. 20).

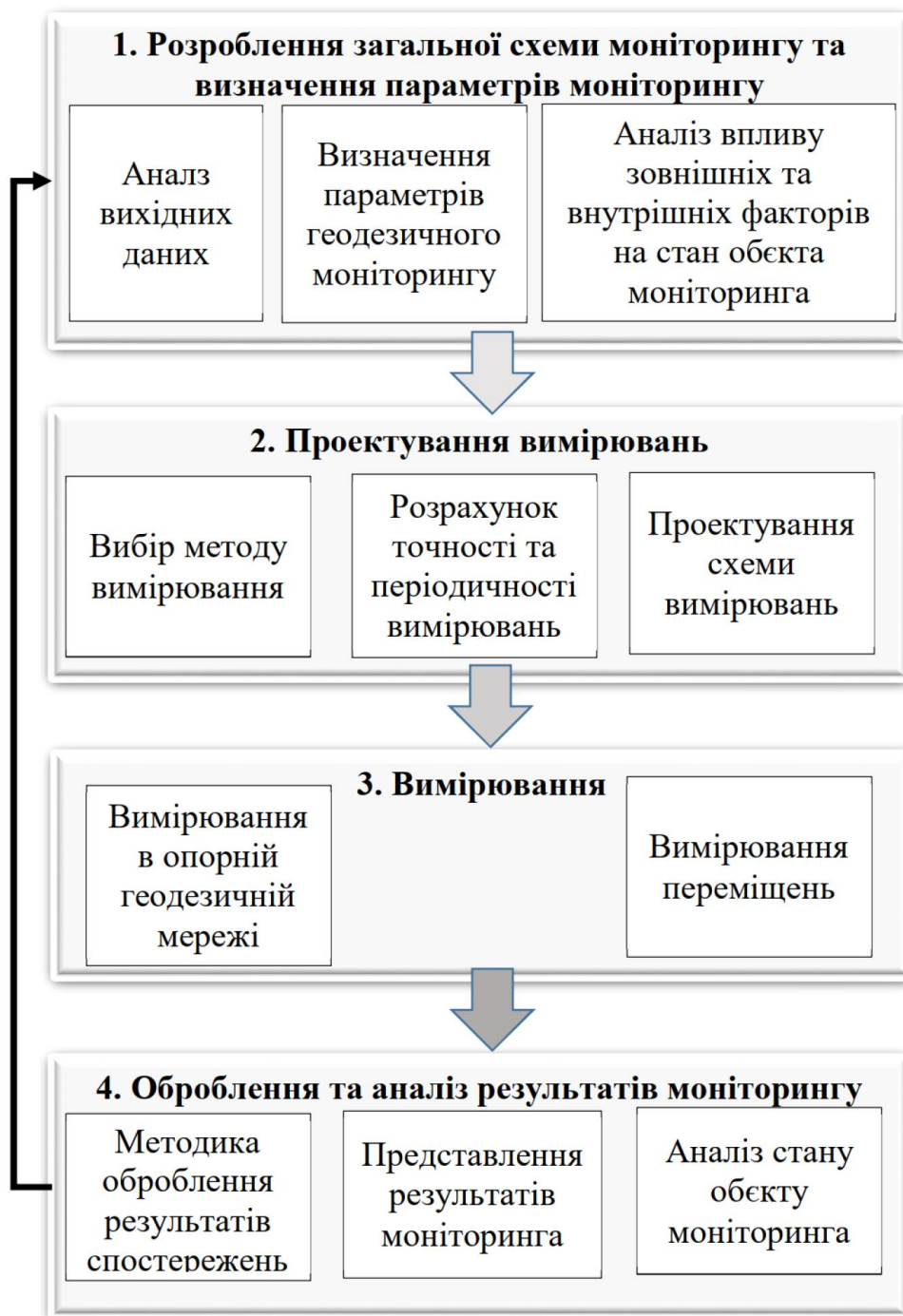


Рис. 20. Узагальнена технологічна схема геодезичного моніторингу

Узагальнену технологічну схему прийнято за основу для розроблення технологічної схеми ГНСС-моніторингу інженерних споруд, що передбачає два варіанти виконання ГНСС-моніторингу. У першому випадку ГНСС-станції розміщено безпосередньо на пунктах визначення переміщень і результати ГНСС-спостережень використовуються безпосередньо як результати моніторингу. У

другому варіанті ГНСС-станції використовують для створення мережі геодезичного моніторингу, а переміщення ГНСС-станцій використовують як допоміжні дані для аналізу переміщень та корегування результатів вимірювань.

Виконано аналіз методик призначення точності геодезичного моніторингу, та на його основі удосконалено методику попереднього розрахунку точності при виконанні геодезичного моніторингу методами ГНСС-спостережень.

Відповідно до концепції проектування геодезичних мереж, що передбачає чотири рівні проектування, проблема розрахунку точності спостережень відноситься до другого рівня на якому виконують оптимізацію ваг спостережень. Запропоновано використовувати метод Particle Swarm Optimization (PSO). Ідея методу полягає у визначенні оптимальних ваг спостережень на основі змоги до точності визначення деформаційних параметрів. Як вихідну було прийнято наступну умову для планової ГНСС мережі:

$$\begin{aligned} u &= \varepsilon_{xx}x + \varepsilon_{xy}y + t_x; \\ v &= \varepsilon_{xy}x + \varepsilon_{yy}y + t_y, \end{aligned} \quad (25)$$

де позначення прийнято відповідно до (18). Модель (25) відповідає умові однорідної деформації. Для кожного деформаційного параметра встановлюються верхні та нижні допустимі значеннями:

$$\begin{aligned} &+\delta\varepsilon_{xx}\varepsilon_{xx}, +\delta\varepsilon_{yy}\varepsilon_{yy}, +\delta\varepsilon_{xy}\varepsilon_{xy}, +\delta t_x t_x, +\delta t_y t_y. \\ &-\delta\varepsilon_{xx}\varepsilon_{xx}, -\delta\varepsilon_{yy}\varepsilon_{yy}, -\delta\varepsilon_{xy}\varepsilon_{xy}, -\delta t_x t_x, -\delta t_y t_y. \end{aligned} \quad (26)$$

Кількість шуканих параметрів може змінюватись в залежності від вихідних даних для розрахунку.

Виконано моделювання точності геодезичного моніторингу методом PSO для ГНСС-мережі 1 (рис. 12) із фіксованою кількістю вимірювань та заданою точністю визначення переміщень  $t_x$ ,  $t_y$ , та деформацій  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_{xy}$ ,  $\varepsilon_y$ . Результати моделювання наведено у табл. 9.

Таблиця 9

#### Результати оптимізації точності ГНСС-вимірювань методом PSO

Пункт	$t_x$ , мм	$t_y$ , мм	PSO $m_x$ , мм	PSO $m_y$ , мм
R14A	7	7	6	7
R17A	7	7	7	6
RO11	7	7	5	5
RO09	7	7	6	7
R15A	7	7	7	6
RO08	7	7	5	5
RO10	7	7	6	5
$\varepsilon_x$ , ppm		0.25		0.25
$\varepsilon_{xy}$ , ppm		0.25		0.21
$\varepsilon_y$ , ppm		0.25		0.2

Результати моделювання для встановлених значень параметрів підтвердили ефективність методу PSO. При заданій точності визначення параметрів деформаційного процесу, метод PSO дозволяє отримати оптимальну програму

спостережень за якою без виконання додаткових вимірювань можна досягти вищої точності визначення деформаційних параметрів.

Дослідження розробленої технології моніторингу було виконано при спостереженні за ділянкою зведення 4-х будинків висотою 75 метрів, яка розташована на західних схилах р. Дніпро, у м. Києві. Для дослідження було запроєктовано ГНСС-мережу (рис. 21) з пунктів якої у подальшому було виконано спостереження точок на ділянці у комбінації із лінійно-кутовими вимірюваннями. Опрацювання ГНСС-мережі виконано у програмі GeoLab.

За результатами спостережень в першому циклі була побудована тривимірна модель поверхні, яка була використана при подальшому аналізі переміщень точок. За результатами спостережень за деформаційними знаками було побудовано композитну поверхню, за допомогою якої побудовано графік переміщень у вигляді ізоліній (рис. 22).

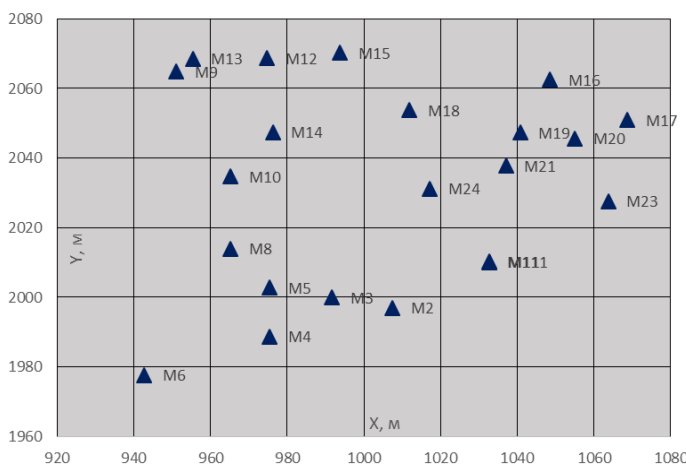
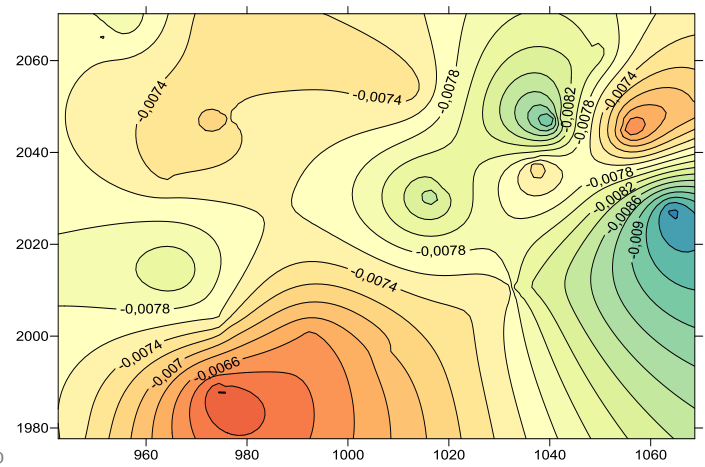


Рис. 21. Схема ГНСС-спостережень





### Результати визначення крену в літній і зимовий періоди

Період	$\Delta X$ , м	$\Delta Y$ , м	Крен, м
Літо	0.060	-0.006	0,061
Зима	0.058	-0.016	0,060
Літо-Зима	0.003	0.010	0,008

Загальна величина крену споруди становить 60 мм. Результати відхилень по координатним осям за добу наведено на рис. 23 і рис. 24.



Рис. 23. Добові переміщення ГНСС-антени, вісь X

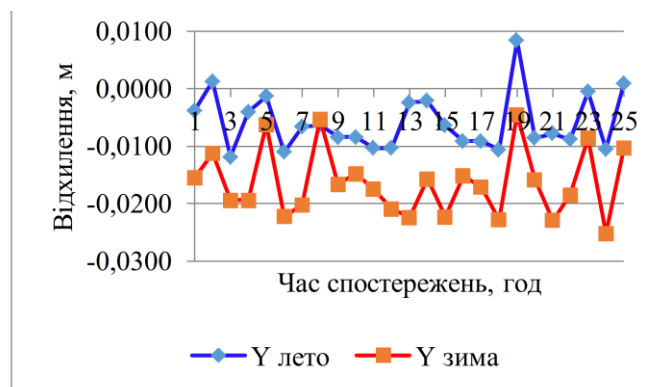


Рис. 24. Добові переміщення ГНСС-антени, вісь Y

Встановлено, що переміщення у напрямку осі X в літній і зимовий періоди мають випадковий характер, у напрямку осі Y - чітко виражені систематичні відхилення. Отримані результати вказують на вплив зовнішніх факторів на будівлю. Для визначення вигину недостатньо виконати вимірювання тільки у верхній точці будівлі. Тому у випадку ГНСС-моніторингу, варто ГНСС-спостереження доповнювати іншими наземними методами спостережень.

Розроблено та досліджено математичну модель попереднього розрахунку точності комбінованих наземних та ГНСС-спостережень при виконанні геодезичного моніторингу інженерних споруд. Модель містить три складові: похибки ГНСС-мережі, похибки визначення координат станції спостережень та похибки вимірювань переміщень деформаційних марок. Запропоновано наступну модель розрахунку точності вимірювання переміщень:

$$\mathbf{K}_D = 2(\mathbf{K}_{GNSS} + \mathbf{K}_{FS} + \mathbf{K}_M), \quad (28)$$

де:  $\mathbf{K}_{GNSS}$  - коваріаційна матриця похибок ГНСС-мережі;  $\mathbf{K}_{FS}$  - коваріаційна матриця визначення координат станції спостережень за умови відсутності похибок ГНСС-мережі, яку отримують з вирівнювання вільної станції;  $\mathbf{K}_M$  - коваріаційна матриця визначення координат деформаційної марки.

Отримані в розділі результати підтверджують доцільність використання методу ГНСС при вирішенні задач геодезичного моніторингу з урахуванням теоретичних та практичних розробок, що отримані у попередніх розділах.

У розділі 6 «Вдосконалення методів та моделей оброблення результатів ГНСС-спостережень для задач геодезичного моніторингу» запропоновано та досліджено результати ГНСС-спостережень методом фільтрації за Калманом, виконано дослідження різних моделей ваг ГНСС-спостережень при моделюванні вертикальних переміщень методом фільтрації за Калманом. Досліджено моделі опрацювання результатів ГНСС-спостережень із використанням нейронних мереж.

Дослідження результатів ГНСС-спостережень методом фільтрації за Калманом виконано на прикладі опрацювання результатів вимірювань вертикальних переміщень деформаційних марок, що розташовані в тілі гідротехнічної споруди. Запропоновано використовувати модель фільтрації за Калманом із зворотнім згладжуванням. Оцінку вектору стану  $\Delta\hat{\mathbf{X}}_k^s$  та коваріаційної матриці  $\mathbf{K}_k^s$  отримують за виразами:

$$\begin{aligned}\Delta\hat{\mathbf{X}}_k^s &= (\mathbf{A} + \mathbf{B} - \mathbf{I})\mathbf{X}_k + \mathbf{A}\Delta\hat{\mathbf{X}}_k^f + \mathbf{B}\Delta\hat{\mathbf{X}}_k^b, \\ \mathbf{K}_k^s &= \mathbf{A}\mathbf{K}_k^f\mathbf{A}^T + \mathbf{B}\mathbf{K}_k^b\mathbf{B}^T.\end{aligned}\quad (29)$$

де вагові матриці мають наступний вигляд  $\mathbf{A} = \mathbf{K}_k^b(\mathbf{K}_k^f + \mathbf{K}_k^b)^{-1}$ ;  $\mathbf{B} = \mathbf{A} - \mathbf{I} = \mathbf{K}_k^f(\mathbf{K}_k^f + \mathbf{K}_k^b)^{-1}$ ;  $(\mathbf{K}_k^s)^{-1} = (\mathbf{K}_k^f)^{-1} + (\mathbf{K}_k^b)^{-1}$ ;  $\hat{\mathbf{X}}_k^f, \Delta\hat{\mathbf{X}}_k^b$  - оцінки вектора стану при прямій та зворотній фільтрації;  $\mathbf{K}_k^f, \mathbf{K}_k^b$  - оцінки коваріаційної матриці при прямій та зворотній фільтрації.

ГНСС-спостереження було проведено у статичному режимі, з інтервалом в один місяць. Виконано опрацювання ряду переміщень, що містять 32 цикли. Для визначення матриці переходу від нульового до першого циклу спостережень запропоновано наступну модель змін вертикальних переміщень:

$$\Delta h_k = \Delta h_{k-1} + v_{\Delta h} \delta t + a_{\Delta h} \frac{\delta t^2}{2}, \quad (30)$$

де  $\Delta h_k$  - вимірне переміщення;  $v_{\Delta h}$  - швидкість переміщення марки;  $a_{\Delta h}$  - прискорення переміщення марки;  $\delta t$  - інтервал спостережень.

Результати моделювання наведено на рис. 25 та 26.

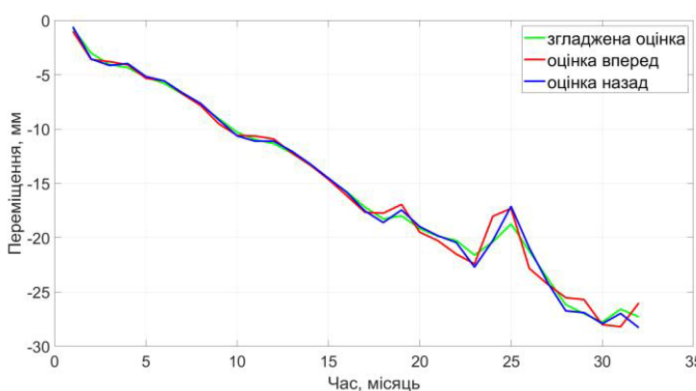


Рис. 25. Графік вимірюваного переміщення та згладженої оцінки

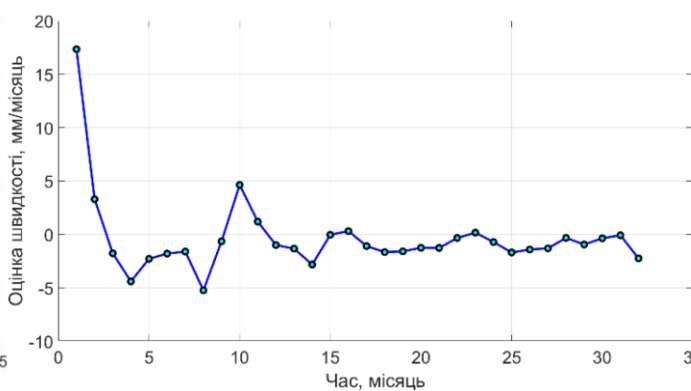


Рис. 26. Графік згладженої оцінки швидкості

Дослідження моделей ваг ГНСС-спостережень при моделюванні вертикальних переміщень методом фільтрації за Калманом виконано на прикладі ГНСС-мережі, що була створена для спостережень за вертикальними і горизонтальними переміщеннями спортивної споруди. Ваги базових ліній розраховувались за моделями 1-7, розділу 3. Було виміряно 25 базових ліній (рис. 27). З усіх визначених переміщень, найбільш суттєве значення мали вертикальні переміщення. Для аналізу вертикальних переміщень було обрано п'ять базових ліній. Обрані для аналізу базові лінії представляють різні екстремальні властивості мережі: найбільша та найменша довжина базової лінії; найбільша та найменша різниця координат; найвища та найнижча точність визначення базової лінії.

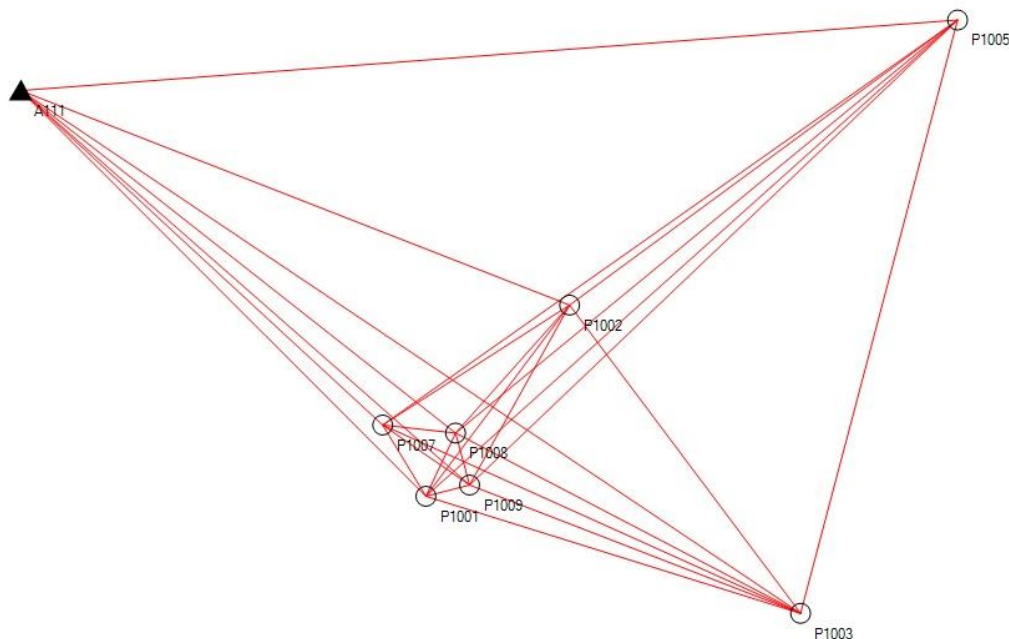


Рис. 27. Схема ГНСС-мережі для моніторингу

Ефективність кожної з моделей було оцінено шляхом застосування власного критерію ефективності. Якщо різниця між СКП для різних моделей перевищує 10 %, тоді така різниця є значимою. Для початку розраховують матрицю  $\mathbf{P}_{gen}$ . Для

елемента  $p_{ij}$ ,  $i$  - номер моделі;  $j$  - номер базової лінії, для якої  $p_j = \left( \frac{c}{m_{\Delta h_i}^2} \right)$ ,  $c = 100$ .

Для кожного стовпчика матриці  $\mathbf{P}_{gen}$  визначають максимальне значення, яке приймають за 100% та обчислюють відхилення ваг від цього значення у відсотках.

Як результат отримують матрицю  $\mathbf{E}_{\%}$ : в якій кожен елемент  $\mathbf{E}_{\%}^{(i)}$  розраховують як

$$\mathbf{E}_{\%}^{(i)} = \mathbf{P}^{(i)} \frac{100\%}{\max(\mathbf{P}^{(i)})}. \quad (31)$$

Матриця  $\mathbf{E}_{\%}$  вказує вага якої моделі має найменший вплив на виміряне переміщення. За згладженими результатами утворюють наступні матриці: **max**, **min** та **SD**, та розраховують матриці:  $\Delta F_{\max\%}$ ,  $\Delta F_{\min\%}$ ,  $\Delta F_{SD\%}$ :

$$\Delta F_{\max\%}^{(i)} = \frac{\max^{(i)} 100\%}{\max(\max^{(i)})} - 100\% ,$$

$$\Delta F_{\min\%}^{(i)} = \frac{\min^{(i)} 100\%}{\max(\min^{(i)})} - 100\% ,$$

$$\Delta F_{SD\%}^{(i)} = \frac{SD^{(i)} 100\%}{\max(SD^{(i)})} - 100\% .$$
(32)

Елементи матриці  $\Delta F_{SD\%}$  дозволяють зробити висновок, що найбільш вдалим варіантом призначення ваг слід визнати моделі (11) та (12) (Моделі 2 та 3). Ці варіанти забезпечують найменші значення СКП фільтрації та найменші за величиною відхилення. При цьому моделі 4 - 7 доцільно використовувати при довжинах векторів понад 10 км, коли значення другої складової у моделях стає суттєвим.

Досліджено моделі опрацювання результатів ГНСС-спостережень за допомогою штучних нейронних мереж (ШНМ). Для порівняння, моделювання та прогнозування переміщень було виконано за стандартною схемою МНК для наступних моделей: поліноміальної, експоненціальної та тригонометричної. Загальним недоліком стандартних моделей є той факт, що виміряні переміщення коливаються відносно модельної кривої. Підвищення ступеню поліному або будь-якої іншої кривої веде до зниження точності визначення коефіцієнтів, а отже не дозволяє повною мірою моделювати фізичний процес переміщень.

Запропоновано стандартну схему нейронної мережі для моделювання переміщень із одним прихованим шаром рис. 28.

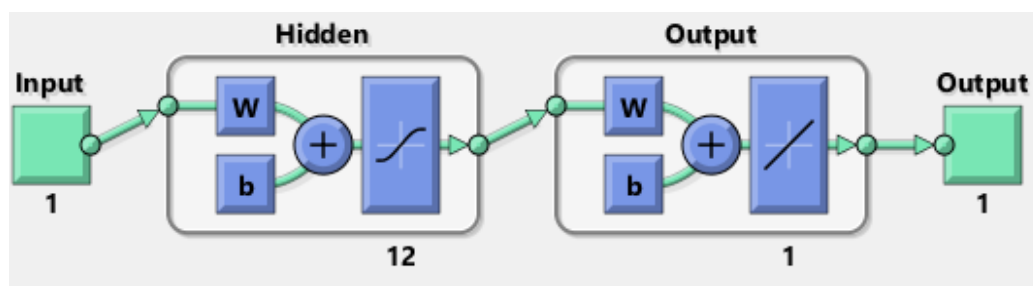


Рис. 28. Схема нейронної мережі

При моделюванні геопросторових даних за допомогою нейронних мереж найбільш важливим питанням є визначення оптимальної кількості нейронів у прихованому шарі. Рекомендовано розрахунок кількості нейронів виконувати за наступним виразом:

$$\frac{mN}{1 + \log_2 N} \leq L_{\omega} \leq m \left( \frac{N}{m} + 1 \right) (n + m + 1) + m ,$$
(33)

де  $n$  - кількість вхідних нейронів ( $n = 1$ );  $m$  - кількість вихідних нейронів ( $m = 1$ );  $N$  - кількість елементів у навчальній вибірці ( $N = 32$ );  $L_{\omega}$  - кількість синаптичних ваг. Для розглянутого випадку кількість нейронів у прихованому шарі буде:

$$L = \frac{L_{\omega}}{n+m} \Rightarrow 4 \leq L \leq 52. \quad (34)$$

Виконано дослідження точності моделювання вертикальних переміщень для різної кількості нейронів, побудовано мережі з 5, 10, 15, 20, 25, 30 та 40 нейронів. Приклади результатів моделювання наведено на рис. 29-30.







	 Samples	 MSE	 R
 Training:	22	2.15711e-0	9.95865e-1
 Validation:	5	2.13117e-0	9.89551e-1
 Testing:	5	9.55554e-0	9.92790e-1

Рис. 29. Результати моделювання переміщень ШНМ на 10-ти нейронах







	 Samples	 MSE	 R
 Training:	22	1.66080e-0	9.96040e-1
 Validation:	5	17.28622e-0	9.74119e-1
 Testing:	5	24.87513e-0	9.81727e-1

Рис. 30. Результати моделювання переміщень ШНМ на 25-ти нейронах

Графік змодельованого процесу та розподілу відхилень для тестової, контрольної та перевірконої вибірок наведено на рис. 31.

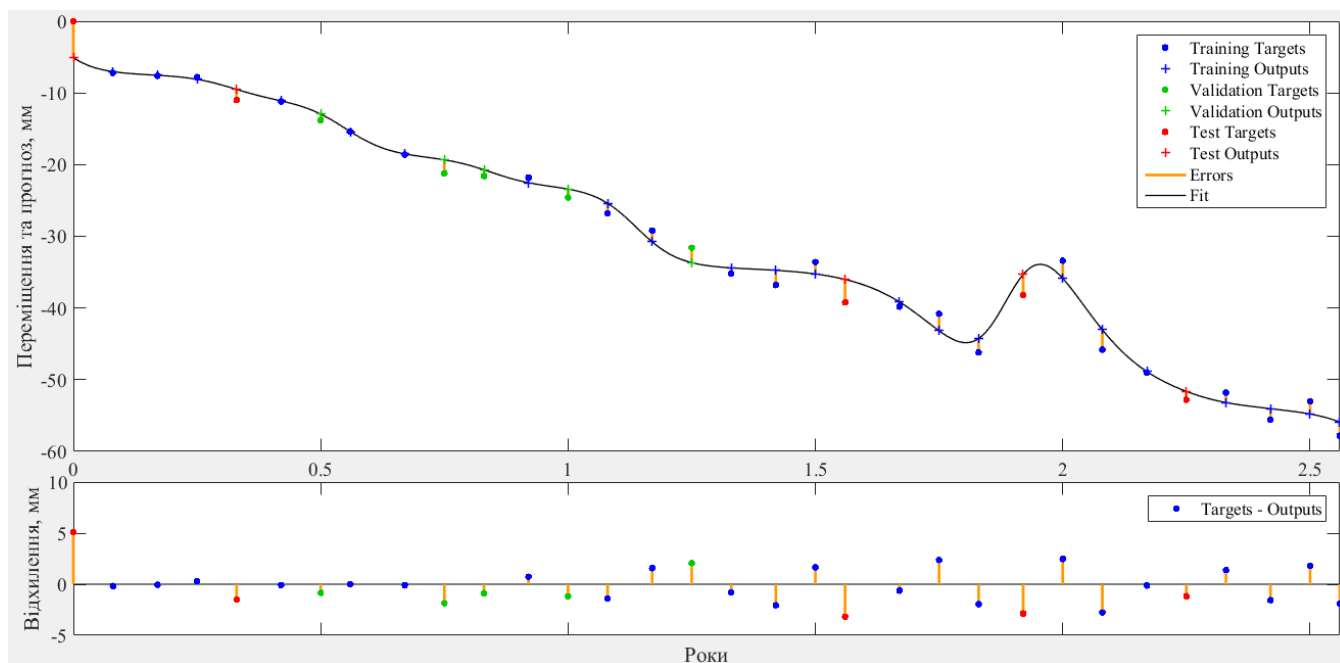


Рис. 31. Графік вимірених та оцінених переміщень для ШНМ на 10-ти нейронах

Отримані результати дозволяють стверджувати, що оптимальною кількістю нейронів у прихованому шарі є 10. За таких умов забезпечується практично однакова точність апроксимації даних (СКП = 1,5 мм), точність підтвердження моделі (СКП = 1,5 мм) та точність перевірки моделі (СКП = 3,1 мм). При збільшенні кількості нейронів, практично необмежено підвищується точність апроксимації, проте точність перевірки моделі стрімко знижується.

Загалом, модель на 10-ти нейронах правильно відтворює коливальний характер деформаційного процесу і за умови включення до цієї моделі додаткових даних (коливання рівня води у водосховищі, коливання температури тощо) дозволяє найбільш повно і достовірно описати деформаційний процес.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі виконані теоретичні узагальнення і отримано нові теоретичні та практичні результати щодо вирішення проблеми геодезичного моніторингу інженерних споруд засобами ГНСС-технологій. Отримані теоретичні та практичні результати дозволяють зробити наступні висновки:

1. Виконано аналіз сучасного стану та класифіковано сучасні методи геодезичного моніторингу. Порівняльний аналіз функціональних і технічних можливостей різного геодезичного обладнання вказує, що ГНСС мають значний потенціал для вирішення задачі геодезичного моніторингу інженерних споруд. Повноцінне застосування ГНСС можливе за умови розроблення та впровадження нових технологічних схем, методів та моделей опрацювання даних.
2. Виконано аналіз систем координат та моделей перетворення висот при виконанні геодезичного моніторингу засобами ГНСС. Запропоновано методику введення умовних систем координат для виконання ГНСС-моніторингу та редукування геодезичних вимірювань при комбінованому використанні ГНСС та електронних тахеометрів, що базується на використанні глобальних моделей геоїда і забезпечує точність порівняну і точністю ГНСС для інженерних споруд, що мають розміри до 5 км.
3. Виконано експериментальне дослідження глобальних моделей геоїда: XGM2019e, SGG-UGM-1, EIGEN-6C4, EGM2008, GEOID2018 та встановлено, що модель EGM2008 має практично нульове відхилення від моделі GEOID2018, та характеризується СКП рівною 23 мм, що дозволяє рекомендувати цю модель для проведення геодезичного моніторингу засобами ГНСС. Запропоновано математичну модель та методику перетворення висот із використанням глобальних моделей геоїда, що дозволяє виконувати перетворення висот та їх уточнення під час моніторингу.
4. Виконано теоретичне та експериментальне дослідження методів оптимізації геодезичних мереж, які створюються засобами ГНСС, за результатами якого розроблено математичну модель попереднього розрахунку точності ГНСС-мереж з використанням методу спотвореної математичної моделі. В розробленій моделі запропоновано виконувати статистичне моделювання ГНСС-мереж з використанням методу Монте-Карло. Досліджено дві ГНСС-

мережі, що були створені методом ГНСС для спостережень за інженерними спорудами атомних електростанцій. Визначено оптимальну модель призначення ваг для опрацювання ГНСС-мереж побазовим методом та вдосконалено технологію проектування ГНСС-мереж.

5. Удосконалено математичну модель контролю стабільності пунктів ГНСС-мереж, що дозволяє за результатами статистичного аналізу виявляти пункти, що зазнали найбільших переміщень та встановлювати наявність деформаційного процесу. Запропоновано методику дослідження стабільності пунктів ГНСС-мережі та ідентифікації переміщень пунктів мережі. Запропоновану модель було досліджено на прикладі ГНСС-мережі АЕС.
6. Запропоновано математичну модель та методику дослідження переміщень великих інженерних споруд за результатами ГНСС-спостережень, що базується на використанні методу скінчених елементів і дозволяє виявити місця концентрації деформацій. Запропоновану модель було апробовано на прикладі ГНСС-мережі, створеної для моніторингу території АЕС. Отримані результати кореспондуються із результатами, що були отримані при дослідження стабільності пунктів мережі статистичним методом.
7. Розроблено систему нормування точності виконання геодезичного моніторингу засобами ГНСС-технологій, яка дозволяє встановити необхідну точність та інтервали спостережень для різних типів інженерних споруд. Система враховує відмінність між традиційними методами спостережень та ГНСС, для яких фактором обмеження є не кількість інтервалів спостережень, а точність визначення координат.
8. Вперше розроблено математичну модель та на її основі методику виконання попереднього розрахунку точності комбінованих наземних та ГНСС-спостережень при виконанні геодезичного моніторингу інженерних споруд, яка призначена для оптимального проектування систем геодезичного моніторингу.
9. Виконано експериментальні дослідження застосування ГНСС для визначення переміщень інженерних споруд. Ефективність та точність ГНСС при спостереженні за горизонтальними переміщеннями було досліджено на прикладі спортивної споруди – стадіону. Можливість ГНСС при визначенні кренів висотних споруд було досліджено на прикладі висотної споруди у м. Києві. Точність визначення кренів склала 6 мм по кожній з координатних осей. Вкрай ефективною виявилася технологія ГНСС при спостереженнях за зсувами на забудованій території. Точність спостережень на зсувах дозволила застосувати режим РТК для визначення горизонтальних переміщень з точністю 20 мм.
10. Досліджено існуючі підходи до прогнозування переміщень. Розроблено нові та удосконалено існуючі математичні моделі прогнозування деформаційних процесів на прикладі результатів експериментальних спостережень за різними типами інженерних споруд, отриманих засобами ГНСС-технологій. Досліджено ефективність та точність прогнозування вертикальних переміщень із використання фільтрації за Калманом. Отримано кінематичні моделі переміщень, що дозволяють прогнозувати переміщення, їх швидкості та прискорення. Для врахування впливу різних факторів на характер

деформаційного процесу запропоновано використовувати математичну модель прогнозування на базі нейронних мереж. Дослідженням встановлено, що деформаційні процеси описується нейронною мережею базисних функцій з одним прихованим шаром.

11. Отримані теоретичні та практичні результати дають можливість розширити сферу застосування ГНСС та спрямувати подальші дослідження в напрямку інтегрування ГНСС з іншими вимірювальними засобами, вдосконалення теоретичних моделей та алгоритмів програмного забезпечення для опрацювання даних, теоретичного та практичного використання ГНСС в задачах геодезичного моніторингу.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у наукових фахових виданнях України

1. Анненков А. А. Моніторинг крупних спортивних споруд на прикладі стадіона «Донбасс-Арена». *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-геологічна*. 2013. Вип. №1(18). С. 56-60. (РИНЦ)
2. Анненков А. О. Вдосконалення системи геодезичного моніторингу інженерних споруд. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. Вип. 77. С. 21 -28. DOI: 10.31650/2415-377X-2019-77-21-28 (Google Scholar, Index Copernicus)
3. Анненков А.О. Застосування методу нейронних мереж при геодезичному моніторингу інженерних споруд. *Вісник Криворізького національного університету*. 2020. Вип. 51. С. 8-16. DOI: 10.31721/2306-5451-2020-1-51-8-16 (Google Scholar, Index Copernicus)
4. Лобов М. И., Анненков А. А., Маликов С. В. Геодезический мониторинг спортивного комплекса «Донбасс Арена» в процессе эксплуатации. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2012. Вип. I (23). С. 154-158. (Index Copernicus, Google Scholar)
5. Анненков А. А. Дослідження умов виконання геодезичних робіт в реакторних відділеннях атомних електростанцій. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-геологічна*. 2009. Вип. 9(143). С. 47-50.
6. Анненков А. О. Нормування точності геодезичних робіт при будівництві висотних споруд. *Інженерна геодезія*. 2010. Вип. 55. С. 11-14.
7. Лобов М. И., Анненков А. А., Маликов С. С. Совершенствование технологии геодезических работ при проведении мониторинга спортивного комплекса «Донбасс-Арена». *Нові технології в будівництві*. Вип. 2(22). 2011. С. 38-41.
8. Лобов М. И., Анненков А. А., Переварюха А. Н., Маликов С.С., Товстенко Р.И. Организация геодезического мониторинга крупных объектов на подрабатываемых территориях. *Інженерна геодезія*. Вип. 58. 2012. С. 17-27.
9. Шульц Р. В., Анненков А. О. Сучасна концепція застосування GNSS-технологій при вирішенні задач геодезичного моніторингу інженерних споруд. *Містобудування та територіальне планування*. 2013. Вип. 47. С. 702-710.



10. Шульц Р. В., Анненков А. О. Перспективы и проблемы использования GNSS-технологий в задачах геодезического мониторинга инженерных сооружений. *Містобудування та територіальне планування*. 2013. Вип. 48. С. 502-508.
11. Шульц Р. В., Анненков А. О., Хайлак А. М. Особливості реалізації проекту спостережень за зсувними процесами на прикладі будівництва житлового комплексу у м. Києві. *Містобудування та територіальне планування*. 2013. Вип. 49. С. 632-646.
12. Шульц Р. В., Білоус М. В., Анненков А. О., Ковтун В.Я., Хайлак А.М. Особливості інженерно-геодезичного забезпечення будівництва стадіону «АРЕНА ЛЬВІВ». *Містобудування та територіальне планування*. 2013. Вип. 50. С. 759-766.
13. Шульц Р. В., Анненков А. О., Мельник О. В., Хайлак А. М. Оброблення результатів інженерно-геодезичних спостережень за осіданнями за допомогою методу фільтрації за Калманом. *Інженерна геодезія*. 2014. Вип. 60. С. 45-63.
14. Шульц Р. В., Анненков А. О., Терещук О. І., Нисторьяк І. О. Практичні дослідження точності визначення координат за супутниковими технологіями в режимі реального часу. *Інженерна геодезія*. 2014. Вип. 61. С. 58-75. (Google Scholar)
15. Mushchanov V., Annenkov A., Orzhekhovskiy A. Accounting for the probabilistic nature of geometric imperfections form spatial coatings on the stands braced cantilever type. *METAL CONSTRUCTIONS*. 2014. Vol. 20. №3. P. 169–178. (Google Scholar, РИНЦ)
16. Шульц Р. В., Білоус М. В., Анненков А. О., Ковтун В. Я. Шляхи вирішення проблеми розроблення кошторисних вартісних показників на інженерно-геодезичні роботи в промисловому та цивільному будівництві. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*. 2014. Вип. 6. С. 310-317. (Index Copernicus, Worldcat, Google Scholar)
17. Анненков А. О. Статистичне моделювання GNSS-вимірювань при створенні геодезичних мереж на геодинамічних полігонах. *Містобудування та територіальне планування*. 2015. Вип. 57. С. 16-28.
18. Анненков А. О. Моделювання просторових переміщень пунктів європейської перманентної ГНСС-мережі EPN/EUREF методом скінченних елементів. *Містобудування та територіальне планування*. 2016. Вип. 62. Ч. 1. С. 20-35.

#### **Статті у міжнародних наукових періодичних виданнях**

19. Шульц Р. В., Терещук А. И., Жалило А. А., Анненков А. А., Желанов А. А., Нисторьяк И. А. Предварительные результаты GNSS-наблюдений на пунктах геодезической сети северного региона Украины. *Вестник СГГА (Сибирской Государственной Геодезической Академии)*. 2014. Вып. 4(28). С. 29-38. (Google Scholar, РИНЦ)
20. Шульц Р. В., Анненков А. А., Куличенко Н. В. Опыт использования современных технологий в задачах геодезического мониторинга высотных зданий. *Вестник МГСУ (Московского Государственного Строительного Университета)*. 2016. Вып. 1. С. 80-93. (Index Copernicus, Worldcat, EBSCO, Ulrich's periodicals, Google Scholar, РИНЦ)

**Статті у наукових періодичних виданнях держав, що входять до Європейської організації економічного співробітництва або включені до наукометричних баз Scopus, Web of Science**

21. Shults, R., Annenkov, A., Bilous, M. Kovtun, V. Interpretation of geodetic observations of the high-rise buildings displacements. *Geodesy and Cartography*. 2016. Volume 42(2). P. 39–46. <https://doi.org/10.3846/20296991.2016.1198566> (SCOPUS, Q4)
22. Shults R., Annenkov A. Investigation of the different weight models in Kalman filter: A case study of GNSS monitoring results. *Geodesy and Geodynamics*. Volume 9, Issue 3. May 2018. P. 220-228. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.09.003> (WoS, SCOPUS, Q2)
23. R. Schultz, A. Annenkov, A. Khailak, V. Strilec. Statistical research of retaining walls displacement on the results of geodetic measurements by analysis of variance. *MOTROL*. Poland. 2014. Vol. 16. No 8. P. 81-93 (Index Copernicus, AGRO).

**Статті у збірниках праць за матеріалами конференцій**

24. Шульц Р. В., Медведський Ю. В., Хайлак А. М., Анненков А. О. Особливості розробки проекту спостережень за зсувними процесами в умовах будівництва висотних споруд з використанням сучасних геодезичних технологій. *XVIII міжнародний науково-технічний симпозіум «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища. GNSS і GIS-технології»*: Зб. матеріалів. 10-15 вересня 2013р. Алушта (Крим). 2013. С. 192-198.
25. Шульц Р.В., Білоус М. В., Анненков А. О., Ковтун В. Я. Современное состояние и пути усовершенствования расценок на инженерно-геодезические работы в промышленно-гражданском строительстве в Украине. *«Инновации и ГИС технологии для развития территорий»*: Материалы международной конференции 10-11 августа 2014г. Усть-Каменогорск Республика Казахстан. 2014. С. 80-92.
26. Шульц Р. В., Белоус Н. В., Ковтун В. Я., Анненков А. О. Комплексный геодезический мониторинг высотных зданий. *«ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ»*. Сибирский государственный университет геосистем и технологий. Новосибирск. 2015. С. 109-115. (Google Scholar, РИНЦ)
27. Анненков А. О. Методика аналізу просторових переміщень пунктів Європейської перманентної ГНСС-мережі EPN/EUREF за період 2007-2014рр. *«ГЕОПРОСТІР – 2015»*: Матеріали Першої міжнародної науково-технічної конференції. 12-14 листопада 2015р. Київ. 2015. С. 9-13.
28. Шульц Р. В., Анненков А. О., Кучеренко О. О. Застосування ГНСС-технологій при вирішенні завдань геодезичного моніторингу будівництва. *«Перезавантаження будівництва: Економіка, організація, менеджмент»*: Тези доповідей другої міжнародної науково-практичної конференції. 09-11 листопада 2016р. Київ. 2016. С. 9-11.
29. Анненков А. О. Використання динамічних систем на базі штучних нейронних мереж у процесі геодезичного моніторингу інженерних споруд. *«GEOFORUM'2018»*: тези доповідей 23-тя Міжнародна науково-технічна конференція, присвячена професійному святу працівників геології і

- картографії України. 18-20 квітня 2018 р., Львів- Яворів-Брюховичі. 2018. С. 27-28.
30. Анненков А. О. Дослідження моделей GNSS-спостережень при моделюванні деформацій методом фільтрації за Калманом. «ГЕОПРОСТІР 2017»: збірник тез доповідей III Міжнародна наукова-технічна конференція. 4-6 грудня 2017 р. Київ, 2017. С. 6-9.
  31. R. Shults, A. Urazaliev, A. Annenkov, O. Nesterenko, O. Kucherenko, K. Kim Different Approaches to Coordinate Transformation Parameters Determination of Nonhomogeneous Coordinate Systems. *11th International Conference "Environmental Engineering"*. Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania, 21–22 May 2020. P. 1-7. <https://doi.org/10.3846/enviro.2020.687>

## АНОТАЦІЯ

**Анненков А.О. Теорія і практика застосування ГНСС-технологій в задачах геодезичного моніторингу інженерних споруд.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія та картографія. – Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2021.

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему застосування ГНСС-технологій при розв'язанні завдань геодезичного моніторингу інженерних споруд.

Виконано аналіз сучасного стану проблеми моніторингу інженерних споруд та визначено основні фактори, що призводять до виникнення аварійних ситуацій та ускладнення експлуатації споруд.

Виконано аналіз систем координат та розроблено і досліджено математичні моделі перетворення висот, що дозволило розробити практичні рекомендації щодо використання глобальних моделей геоїда при виконанні геодезичного моніторингу.

Значну увагу приділено питанню оптимізації ГНСС мереж. Проведено теоретичне та експериментальне дослідження методів оптимізації геодезичних мереж методом статистичних випробувань.

Розроблено математичні моделі та методики аналізу деформаційних процесів території зведення та експлуатації інженерних споруд.

Для забезпечення технології геодезичного моніторингу засобами ГНСС запропоновано технологічну схему моніторингу та методики попереднього розрахунку точності ГНСС-спостережень методом PSO та попереднього розрахунку точності комбінованих наземних та ГНСС-спостережень.

Удосконалено математичні моделі прогнозування деформаційних процесів на прикладі результатів експериментальних спостережень за різними типами інженерних споруд, отриманих засобами ГНСС-технологій. Досліджено математичні моделі, що базуються на використанні фільтрації за Калманом та штучних нейронних мереж.

**Ключові слова:** моніторинг, інженерна споруда, ГНСС-моніторинг, деформація, розрахунок точності, метод Монте-Карло, метод скінчених елементів, штучна нейронна мережа, фільтрація за Калманом.

## АННОТАЦИЯ

**Анненков А.О. Теория и практика применения ГНСС-технологий в задачах геодезического мониторинга инженерных сооружений.** – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.24.01 – Геодезия, фотограмметрия и картография. – Киевский национальный университет строительства и архитектуры, МОН Украины, Киев, 2021.

В диссертационной работе решена научно-прикладная проблема применения ГНСС-технологий при решении задач геодезического мониторинга инженерных сооружений.

Выполнен анализ современного состояния проблемы мониторинга инженерных сооружений и определены основные факторы и нагрузки, приводящие к возникновению аварийных ситуаций и осложнений при эксплуатации сооружений. Классифицированы методы геодезического мониторинга. Подчеркнута роль современных автоматизированных систем геодезического мониторинга и эффективность комбинированного использования ГНСС и наземных измерений.

Исследованы современные глобальные модели геоидов. Выполнен анализ систем координат и разработаны и исследованы математические модели преобразования высот, что позволило разработать практические рекомендации по использованию глобальных моделей геоида при выполнении геодезического мониторинга средствами ГНСС и комбинировании ГНСС и наземных наблюдений. Исследована точность получения уклонов отвесных линий для совместного уравнивания ГНСС и наземных наблюдений.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование методов оптимизации геодезических сетей методом статистических испытаний. Определены оптимальные модели установления весов базовых линий для уравнивания ГНСС-сетей побазовым методом. Усовершенствована математическая модель контроля стабильности пунктов пространственных ГНСС-сетей.

Разработаны математические модели и методики анализа деформационных процессов территорий возведения и эксплуатации инженерных сооружений. Математические модели базируются на использовании уравнений напряженно-деформированного состояния для плоской и пространственной моделей и метода конечных элементов. Эффективность плоской модели исследована на примере ГНСС мониторинга за спортивным сооружением. Эффективность пространственной модели апробирована на примере мониторинга территорий объектов энергетики.

Разработана обобщенная технологическая схема мониторинга и методики предварительного расчета точности ГНСС-наблюдений методом PSO и предварительного расчета точности комбинированных наземных и ГНСС-наблюдений.

Усовершенствованы математические модели прогнозирования деформационных процессов на примере результатов экспериментальных наблюдений за различными типами инженерных сооружений, полученных средствами ГНСС-технологий. Исследованы математические модели, базирующиеся на использовании фильтрации по Калману. Для сравнения были исследованы

математические модели на базе искусственных нейронных сетей, которые показали высокую точность моделирования и прогнозирования деформационных процессов.

Выполнены экспериментальные исследования ГНСС-технологий при создании ГНСС-сетей, при выполнении геодезического мониторинга территорий возведения и эксплуатации инженерных сооружений, высотных сооружений, крупных спортивных сооружений и объектов атомной энергетики.

**Ключевые слова:** мониторинг, инженерное сооружение, ГНСС-мониторинг, деформация, расчет точности, метод Монте-Карло, метод конечных элементов, искусственная нейронная сеть, фильтрация по Калману.

### ABSTRACT

**Annenkov A.O. Theory and practice of GNSS application for geodetic monitoring tasks of engineering structures.** – Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree doctor of technical sciences on a major 05.24.01 – Geodesy, Photogrammetry, and Cartography. – Kyiv National University of Construction and Architecture, MES Ukraine, Kyiv, 2021.

In the dissertation, the scientific and applied problem of using GNSS technologies to solve the problems of geodetic monitoring of engineering structures has been solved.

The state-of-the-art analysis of the problem of monitoring engineering structures has been carried out. Methods of geodetic monitoring are classified, and the place of GNSS technologies in solving problems of geodetic monitoring has been determined.

The analysis of coordinate systems has been carried out, and mathematical models for the transformation of heights have been developed and investigated, making it possible to develop practical recommendations for the use of global geoid models when performing geodetic monitoring employing GNSS and combining GNSS and terrestrial observations.

Mathematical models and methods of analysis of deformation processes in the territories of construction and operation of engineering structures have been developed. Mathematical models are based on the use of equations of the stress-strain state for plane and spatial models and the finite element method.

To provide the technology of geodetic monitoring employing GNSS, a technological scheme of monitoring and methods of preliminary calculation of GNSS observations' accuracy by the PSO method.

Mathematical models for predicting deformation processes have been improved on the example of the results of experimental observations of various types of engineering structures obtained through GNSS technologies. Mathematical models based on the use of Kalman filtering and artificial neural networks have been investigated.

Experimental studies of GNSS technologies have been carried out when creating GNSS networks when performing geodetic monitoring of territories to construct and operate engineering structures, high-rise buildings, and large sports facilities.

**Keywords:** monitoring, engineering structure, GNSS monitoring, deformation, accuracy calculation, Monte Carlo method, finite element method, artificial neural network, Kalman filtering.