

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ГЕОДЕЗІЇ**

АСМАНОВ РОМАН РОМАНОВИЧ

УДК 528.2:528.4

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА УЗГОДЖЕНОСТІ ДАНИХ ПРИ
ПЕРЕХОДІ ДО ГЕОЦЕНТРИЧНОЇ СИСТЕМИ КООРДИНАТ**

**бакалаврська робота на здобуття кваліфікації
бакалавр геодезії та землеустрою
G18 – Геодезія та землеустрій**

**Науковий керівник:
доцент, кандидат технічних наук
Новікова Олена Миколаївна**

Кривий Ріг – 2026

Криворізький національний університет

Факультет: будівельний

Кафедра: геодезії

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Спеціальностей: G 18 – Геодезія та землеустрій

Затверджую

Завідувач кафедру
Володимир ПЕРЕГУДОВ

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ **на бакалаврську роботу студента** **АСМАНОВУ РОМАНУ РОМАНОВИЧУ**

Тема проекту: Дослідження точності та узгодженості даних при переході до геоцентричної системи координат

- 1. Керівник:** затверджено наказом по КНУ № 897 від «28» 11. 2025 року.
- 2. Термін здачі студентом закінченого проекту** « 01 » червня 2026 р.
- 3. Вихідні дані до проекту:** Для виконання проекту «Дослідження точності та узгодженості даних при переході до геоцентричної системи координат» використовувалися геодезичні, картографічні та супутникові дані, необхідні для аналізу координатного перетворення між системами СК-42, СК-63, WGS-84 та УСК-2000. Основу вихідних даних становили координати пунктів державної геодезичної мережі, отримані у різних системах координат, результати GNSS-спостережень у статичному режимі та режимі RTK, а також матеріали попередніх геодезичних вимірювань. У дослідженні використовувалися просторові прямокутні координати, геодезичні та нормальні висоти пунктів, дані базових станцій мереж ZAKPOS, NGC-NET та СКНОУ, а також параметри трансформації координат і параметри Гельмерта. Для оцінювання точності координатного переходу застосовувалися архівні топографічні та кадастрові матеріали, створені у системах СК-42 і СК-63, цифрові плани території дослідження та результати GNSS-вимірювань, отриманих у системі WGS-84. Обробку та аналіз координатних даних виконували із застосуванням сучасного геодезичного та GIS-програмного забезпечення, зокрема програмного комплексу Digitals. Під час виконання роботи враховувалися нормативні документи та методичні рекомендації щодо впровадження державної геодезичної референційної системи координат УСК-2000, виконання GNSS-вимірювань і координатного трансформування.
- 4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):**
 - У чому полягає різниця між перетворенням і трансформацією координат?
 - Які методи координатного перетворення використовуються у геодезії?
 - Що таке параметри Гельмерта та для чого вони застосовуються?
 - Які параметри входять до семипараметричного перетворення Гельмерта?

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень). Послідовність графічних аркушів:

Схема координатного перетворення між системами СК-42, СК-63, WGS-84 та УСК-2000

Технологічна схема трансформування координат у геоцентричну систему координат

Порівняльний аналіз координатних систем, що використовуються в Україні

Схема побудови трансформаційного поля для переходу між системами координат

Графічне відображення похибок координатного трансформування

Структурна схема переходу до геоцентричної системи координат УСК-2000

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Розділ 1	доц., к.т.н. Новікова О.М.	19.01.26	19.05.26
Розділ 2	доц., к.т.н. Новікова О.М.	15.02.26	25.05.26
Розділ 3	доц., к.т.н. Новікова О.М.	20.02.26	01.06.25

7. Дата видачі завдання 20.01.2026

Керівник проекту (роботи) Новікова О.М. / /

Завдання прийняв до виконання Асманов Р.Р. / /

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ За/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Вивчення та аналіз вихідних матеріалів для написання роботи.	
2	Огляд нормативно-правових та наукових праць.	
3	Схема GNSS-вимірювань та координатного перетворення	
4	Схема координатного перетворення між системами СК-42, СК-63, WGS-84 та УСК-2000	
5	Модель інтеграції локальних та геоцентричних систем координат	
6	Висновки	

Студент – дипломник Асманов Роман Романович/ /

Керівник проекту Новікова Олена Миколаївна / /

АНОТАЦІЯ

У бакалаврській роботі досліджено особливості переходу від локальних систем координат СК-42 та СК-63 до сучасних геоцентричних систем координат WGS-84 та УСК-2000. Основну увагу приділено аналізу точності та узгодженості геодезичних даних під час координатного перетворення і трансформування при виконанні геодезичних та землепорядних робіт.

У роботі розглянуто сучасні методи координатного перетворення, особливості застосування параметрів Гельмерта, принципи побудови трансформаційних полів та використання GNSS-технологій для визначення координат. Проведено аналіз впливу конфігурації опорних пунктів, математичних моделей трансформації та точності вихідних даних на результати координатного переходу.

Для виконання дослідження використано матеріали GNSS-спостережень, координати пунктів державної геодезичної мережі, архівні картографічні матеріали та сучасні програмні засоби геодезичної обробки даних, зокрема програмний комплекс DigitalS. У роботі виконано порівняння координат, отриманих у різних системах координат, оцінено середні квадратичні похибки координатного переходу та проаналізовано узгодженість геопросторових даних.

За результатами дослідження встановлено, що найбільший вплив на точність координатного трансформування мають параметри переходу, якість вихідних координат, локальні деформації геодезичних мереж та рівномірність розташування опорних пунктів. Доведено доцільність використання сучасних геоцентричних систем координат і GNSS-технологій для забезпечення високої точності геодезичних і кадастрових робіт.

Ключові слова: геоцентрична система координат, УСК-2000, WGS-84, СК-42, СК-63, координатне перетворення, трансформування координат, GNSS, RTK, параметри Гельмерта, геодезичні вимірювання, GIS-технології.

ЗМІСТ

		Ст.
Розділ 1	ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГЕОДЕЗИЧНИХ СИСТЕМ КООРДИНАТ ТА КООРДИНАТНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ	
1.1	Основні поняття геодезичних систем координат	
1.2	Дослідження узгодженості геодезичних даних при трансформації площ із СК-63 до УСК-2000	
1.3	Зміна геодезичних координат при переході між референцними еліпсоїдами	
1.4	Дослідження впливу координатних деформацій на точність визначення площ земельних ділянок при переході до геоцентричної системи координат	
1.5	Аналіз зміни площ земельних ділянок унаслідок проекційних спотворень при переході до геоцентричної системи координат	
	ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ	
Розділ 2	ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ GNSS-МЕТОДОМ У РЕЖИМІ RTK	
2.1	Загальна характеристика GNSS-технологій у режимі RTK	
2.2	Особливості визначення координат у режимі реального часу	
2.3	Аналіз мереж активних перманентних станцій	
2.4	Методика дослідження точності GNSS-вимірювань у режимі RTK	
2.5	Оцінка точності координатних визначень	
2.6	Характеристика об'єкта досліджень та методика виконання GNSS-спостережень	
	ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ	
Розділ 3	ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА УЗГОДЖЕНОСТІ ДАНИХ ПРИ ПЕРЕХОДІ ДО ГЕОЦЕНТРИЧНОЇ СИСТЕМИ КООРДИНАТ	
3.1	Загальні положення переходу між системами координат	
3.2	Особливості переходу між СК-42, СК-63 та геоцентричними системами координат	
3.3	Аналіз точності координатного трансформування	
	ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ	
	ВИСНОВОК	
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	
	ДОДАТКИ	

ВСТУП

Сучасний розвиток геодезії, картографії, землеустрою та геоінформаційних систем нерозривно пов'язаний із широким впровадженням супутникових технологій позиціонування, цифрових методів обробки просторових даних та глобальних навігаційних супутникових систем GNSS. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває питання забезпечення точності та узгодженості геодезичних даних при переході від локальних систем координат до сучасних геоцентричних систем координат, які є основою функціонування міжнародних навігаційних, картографічних та кадастрових систем.

Тривалий час на території України для виконання геодезичних і кадастрових робіт використовувалися локальні системи координат СК-42 та СК-63, побудовані на основі еліпсоїда Красовського та прив'язані до системи «Пулково 1942 року». Дані системи координат створювалися відповідно до технічних можливостей свого часу та забезпечували функціонування топографо-геодезичного й земельно-кадастрового забезпечення держави протягом багатьох десятиліть. Однак із розвитком супутникових технологій, глобальних систем позиціонування та цифрових геоінформаційних ресурсів виникла необхідність переходу до сучасних геоцентричних систем координат, сумісних із міжнародними стандартами просторового позиціонування.

Упровадження УСК-2000 стало важливим етапом модернізації державної геодезичної та кадастрової системи України. Нова система координат базується на геоцентричному підході та узгоджена з міжнародними системами координат, зокрема WGS 84 і GRS80, що забезпечує можливість інтеграції результатів GNSS-спостережень, високоточних супутникових вимірювань та сучасних геоінформаційних технологій. Перехід до геоцентричної системи координат дозволяє підвищити точність визначення координат, забезпечити сумісність просторових даних на міжнародному рівні та створити єдину координатну основу для кадастрових, інженерно-геодезичних і картографічних робіт.

Разом із тим процес переходу від локальних систем координат до геоцентричних супроводжується низкою складних науково-технічних проблем, пов'язаних із забезпеченням точності та узгодженості геодезичних даних. Основною причиною виникнення таких проблем є відмінності між параметрами референц-еліпсоїдів, геодезичних датумів, орієнтацією координатних осей та положенням центрів систем координат. У результаті навіть незначні похибки при виконанні координатних трансформацій можуть призводити до зміщення координат точок на декілька метрів, що є критичним для кадастрових, інженерних та моніторингових робіт.

Особливу складність становить проблема узгодженості геодезичних даних, створених у різні періоди та в різних системах координат. Значна частина земельно-кадастрової документації України була сформована саме у системах координат СК-42 та СК-63. При переході до геоцентричної системи координат виникає необхідність трансформації великого обсягу архівних просторових даних із забезпеченням максимальної точності їх перенесення. Недостатньо точне виконання таких перетворень може призводити до появи зміщень меж земельних ділянок, зміни площ, виникнення невідповідностей між кадастровими даними та появи юридичних суперечностей у сфері земельних відносин.

Важливим аспектом дослідження є також вплив картографічних проєкцій на точність визначення геометричних параметрів земельних ділянок. Під час переходу до геоцентричних систем координат просторові дані часто переносяться у плоскі прямокутні координати за допомогою проєкції Гаусса–Крюгера, яка неминуче викликає певні лінійні та площинні спотворення. Величина таких спотворень залежить від положення об'єкта відносно осевого меридіана координатної зони та може суттєво впливати на результати визначення площ земельних ділянок.

Окремої уваги потребує проблема перетворення висотних координат. У сучасних геоцентричних системах координат GNSS-вимірювання забезпечують визначення еліпсоїдальних висот, тоді як у практичній геодезії

та землеустрої традиційно використовуються нормальні або ортометричні висоти. Для забезпечення коректного переходу між цими системами необхідно враховувати модель геоїда та локальні аномалії висот, величина яких на території України може досягати кількох десятків метрів.

Точність координатних трансформацій значною мірою залежить і від використаних математичних алгоритмів перетворення. У сучасній геодезії застосовуються різні методи трансформації координат — від класичних семипараметричних моделей Гельмерта до складних багатопараметричних алгоритмів, які дозволяють враховувати локальні деформації геодезичної основи та забезпечують підвищену точність координатних перетворень. Правильний вибір параметрів трансформації та методів обробки просторових даних є необхідною умовою забезпечення узгодженості геодезичної інформації.

Актуальність теми бакалаврської роботи обумовлена необхідністю забезпечення високої точності координатних перетворень, просторової сумісності кадастрових даних та адаптації національної геодезичної системи до міжнародних стандартів просторового позиціонування. У сучасних умовах цифровізації земельно-кадастрових процесів, розвитку геоінформаційних систем та широкого впровадження GNSS-технологій питання дослідження точності та узгодженості даних при переході до геоцентричної системи координат набуває особливої практичної та наукової значущості.

Метою даної роботи є дослідження впливу координатних трансформацій на точність і узгодженість геодезичних даних при переході від локальних систем координат до сучасної геоцентричної системи координат, аналіз причин виникнення розбіжностей у координатах та площах земельних ділянок, а також оцінка впливу деформацій координатної основи та картографічних проекцій на результати геодезичних обчислень.

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачено:

- проаналізувати особливості локальних і геоцентричних систем координат;

- дослідити методи трансформації координат між системами СК-63, СК-42, WGS-84 та УСК-2000;
- оцінити вплив параметрів референц-еліпсоїдів на точність координатних перетворень;
- дослідити вплив деформацій координатної основи та проекції Гаусса–Крюгера на зміну площ земельних ділянок;
- виконати аналіз узгодженості геодезичних даних при переході до геоцентричної системи координат;
- визначити основні фактори, що впливають на точність кадастрових та геодезичних робіт у сучасних умовах.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для вдосконалення методики трансформації координат, підвищення точності кадастрових даних, забезпечення просторової узгодженості геоінформаційних ресурсів та мінімізації похибок при переході до сучасних геоцентричних систем координат.

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГЕОДЕЗИЧНИХ СИСТЕМ КООРДИНАТ ТА КООРДИНАТНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

1.1 Основні поняття геодезичних систем координат

Геодезія та сучасні геоінформаційні технології базуються на використанні різних систем координат, які забезпечують математичне визначення положення точок на земній поверхні та у навколоземному просторі. Геодезичні системи координат є фундаментальною складовою виконання інженерно-геодезичних робіт, топографічного картографування, супутникових вимірювань, навігації, землеустрою та створення цифрових моделей місцевості. Особливого значення вони набувають у процесі виконання GNSS-спостережень та трансформації координат між різними системами відліку.

Сучасний розвиток супутникових технологій, зокрема використання глобальних навігаційних супутникових систем GPS/GNSS, спричинив необхідність широкого застосування геоцентричних систем координат, які забезпечують єдину світову систему просторового позиціонування. Разом із тим у практиці геодезичних робіт в Україні продовжують використовуватись локальні та державні системи координат, зокрема СК-42 та УСК-2000, що потребує виконання точних координатних перетворень.

Одним із базових понять геодезичних систем координат є геодезичний датум. Геодезичний датум являє собою сукупність параметрів, які визначають положення, орієнтацію та масштаб референц-еліпсоїда відносно тіла Землі. Датум фактично задає основу для побудови всієї системи координат і визначає, яким чином математична модель Землі узгоджується з реальною фізичною поверхнею планети.

У класичних локальних системах координат, таких як СК-42, за основу використовувався еліпсоїд Красовського та вихідний пункт у районі Пулково. При цьому система орієнтувалася таким чином, щоб максимально точно відповідати території колишнього СРСР. У сучасних супутникових

технологіях основним геодезичним датумом є WGS 84, який використовується у глобальній системі позиціонування GPS та забезпечує єдину геоцентричну систему координат для всієї поверхні Землі.

Важливим елементом геодезичних систем координат є референц-еліпсоїд. Земля має складну нерегулярну форму, тому для виконання геодезичних розрахунків її поверхню апроксимують математичною фігурою — еліпсоїдом обертання. Еліпсоїд визначається двома основними параметрами: великою піввіссю a та стисненням f .

Для системи WGS 84 велика піввісь становить:

$$a=6378137 \text{ м}$$

а стиснення дорівнює:

$$f=1298.257223563$$

Для системи СК-42 застосовується еліпсоїд Красовського, параметри якого дещо відрізняються від WGS-84. Саме різниця між параметрами еліпсоїдів та датумів є однією з основних причин виникнення зміщень координат під час переходу між різними системами координат.

Окрім еліпсоїда, у геодезії важливе значення має поняття геоїда. Геоїд - це умовна рівнева поверхня гравітаційного поля Землі, яка наближено співпадає із середнім рівнем Світового океану та його продовженням під материками. На відміну від математично правильної форми еліпсоїда, геоїд має складну хвилясту форму через неоднорідність гравітаційного поля Землі.

Відстань між поверхнею геоїда та еліпсоїдом називається висотою геоїда або ундуляцією:

$$N=h-H$$

де:

- N — висота геоїда;
- h — еліпсоїдальна висота;
- H — ортометрична висота.

Для території України значення ундуляції можуть досягати кількох десятків метрів, що має суттєвий вплив на результати високоточних

супутникових вимірювань. Саме тому при виконанні інженерно-геодезичних робіт важливо враховувати взаємозв'язок між еліпсоїдальними та фізичними висотами.

Основною формою представлення положення точок у геодезії є геодезичні координати. До них належать:

- геодезична широта φ
- геодезична довгота λ ;
- еліпсоїдальна висота h .

Широта визначає кут між нормаллю до поверхні еліпсоїда та площиною екватора, довгота - кут між площиною початкового меридіана та площиною меридіана точки, а висота характеризує відстань точки від поверхні еліпсоїда.

Під час роботи з GPS/GNSS-приймачами координати об'єктів первинно визначаються саме у геодезичній системі координат, прив'язаній до WGS 84. Для подальшого використання у топографо-геодезичних роботах вони часто перетворюються у державні або місцеві системи координат.

Для виконання математичних перетворень між різними системами координат широко застосовуються просторові прямокутні координати (X,Y,Z), початок яких розташований у центрі мас Землі. Така система координат має назву Earth- (ECEF) і використовується у супутниковій геодезії.

Перехід від геодезичних координат до геоцентричних виконується за формулами:

$$X = (N + h) \cos \varphi \cos \lambda$$

$$Y = (N + h) \cos \varphi \sin \lambda$$

$$Z = (N(1 - e^2) + h) \sin \varphi$$

де:

- N — радіус кривизни першого вертикала;
- e — ексцентриситет еліпсоїда;
- h — еліпсоїдальна висота;

- φ — геодезична широта;
- λ — геодезична довгота.

Прямокутні просторові координати є основою для виконання координатних трансформацій, зокрема семи параметричного перетворення Гельмерта, яке використовується для переходу між системами координат WGS-84, СК-42 та УСК-2000.

УСК-2000 є сучасною державною системою координат України, створеною з урахуванням міжнародних геодезичних стандартів та сумісності із супутниковими технологіями. Її впровадження дозволило підвищити точність геодезичних робіт та забезпечити інтеграцію національної геодезичної мережі у світову систему координат.

Таким чином, геодезичні системи координат є невід’ємною складовою сучасної геодезії та супутникових технологій. Глибоке розуміння принципів побудови геодезичних систем, особливостей датумів, еліпсоїдів, геоїда та методів координатних перетворень є необхідною умовою для забезпечення високої точності геодезичних вимірювань. Неврахування особливостей різних систем координат може призвести до значних похибок у визначенні просторового положення об’єктів, що особливо критично при виконанні високоточних інженерних, кадастрових та навігаційних робіт.

1.2 Дослідження узгодженості геодезичних даних при трансформації площ із СК-63 до УСК-2000

Однією з найважливіших складових сучасного геодезичного та кадастрового забезпечення є використання єдиної координатної основи для визначення просторового положення земельних ділянок, об’єктів нерухомості та інженерної інфраструктури. Саме система координат виступає базовим елементом функціонування державних кадастрових інформаційних систем, забезпечуючи просторову узгодженість геодезичних даних, можливість інтеграції результатів вимірювань та коректність виконання координатних перетворень. В Україні формування електронної кадастрової бази даних

земельних ділянок розпочалося наприкінці 1990-х років із використанням системи координат СК-63, яка тривалий час залишалася основою для ведення земельного кадастру, створення картографічних матеріалів та виконання землеустрою. У результаті значна кількість земельних ділянок, внесених до державного земельного кадастру, була сформована саме у цій системі координат.

Разом із розвитком супутникових геодезичних технологій та інтеграцією України у міжнародний геоінформаційний простір виникла необхідність переходу до сучасної геоцентричної системи координат УСК-2000, яка базується на міжнародних геодезичних стандартах та є сумісною з глобальними навігаційними супутниковими системами GPS/GNSS. Впровадження нової системи координат стало важливим етапом модернізації національного геодезичного та кадастрового забезпечення, однак водночас спричинило низку складних науково-технічних, юридичних та економічних проблем, пов'язаних із необхідністю трансформації великого масиву вже існуючих просторових даних.

Перехід від локальної системи координат СК-63 до сучасної геоцентричної системи координат УСК-2000 супроводжується зміною координат поворотних точок земельних ділянок, що безпосередньо впливає на результати визначення геометричних характеристик об'єктів землеустрою, насамперед площ земельних ділянок. У багатьох випадках після трансформації координат спостерігається невідповідність між площами, визначеними у різних системах координат, що створює проблеми у сфері земельно-кадастрового обліку, реєстрації прав власності, оподаткування земель та ведення технічної документації.

Особливої актуальності ця проблема набуває у зв'язку з тим, що площа земельної ділянки є однією з основних характеристик об'єкта нерухомості та використовується під час виконання практично всіх земельно-правових операцій, включаючи купівлю-продаж, оренду, дарування, спадкування, встановлення меж земельних ділянок та проведення нормативної грошової

оцінки земель. Навіть незначна зміна площі внаслідок переходу до іншої системи координат може призводити до юридичних суперечностей, необхідності переоформлення документації та виникнення додаткових фінансових витрат.

Однією з основних причин виникнення розбіжностей між результатами визначення площ у різних системах координат є відмінність параметрів геодезичних датумів та референц-еліпсоїдів, на яких базуються відповідні системи координат. Система СК-63 створювалася на основі еліпсоїда Красовського та локального орієнтування координатної основи, тоді як УСК-2000 реалізована як геоцентрична система координат, узгоджена з міжнародними системами відліку та супутниковими технологіями. Відмінність між центрами систем координат, орієнтацією координатних осей та геометричними параметрами еліпсоїдів призводить до зміни просторового положення точок після трансформації координат.

Важливим фактором також є наявність локальних деформацій координатної основи, які накопичувалися протягом тривалого періоду експлуатації старих геодезичних мереж. Такі деформації виникали внаслідок впливу систематичних та випадкових похибок під час створення геодезичних мереж, використання різних методів вимірювань, технічних обмежень обладнання попередніх поколінь, а також неточностей під час побудови картографічної основи. У результаті окремі ділянки території можуть характеризуватися неоднорідними спотвореннями координат, що особливо проявляється під час переходу до сучасних високоточних геоцентричних систем координат.

Ще одним суттєвим чинником зміни площ земельних ділянок є вплив картографічних проекцій, зокрема проекції Гаусса-Крюгера, яка традиційно використовувалася у системах координат СК-42 та СК-63. Будь-яка картографічна проекція неминуче супроводжується певними геометричними спотвореннями, які можуть проявлятися у зміні довжин ліній, кутів та площ. При переході до іншої координатної системи та виконанні повторного

проектування координат величина таких спотворень може змінюватися, що безпосередньо впливає на результати визначення площ земельних ділянок.

У сучасних умовах широкого використання GNSS-технологій, електронних тахеометрів та цифрових геоінформаційних систем питання забезпечення точності та узгодженості геодезичних даних при переході до геоцентричних систем координат набуває особливої наукової та практичної значущості. Коректне виконання координатних трансформацій є необхідною умовою забезпечення просторової сумісності кадастрових даних, достовірності результатів геодезичних вимірювань та ефективного функціонування державного земельного кадастру.

Таким чином, дослідження точності та узгодженості геодезичних даних при переході до геоцентричної системи координат є актуальним напрямом сучасної геодезії та землеустрою. Аналіз причин виникнення розбіжностей у площах земельних ділянок, оцінка впливу параметрів систем координат, деформацій геодезичної основи та картографічних проекцій дозволяють підвищити точність кадастрових робіт, забезпечити коректність просторових даних та мінімізувати можливі помилки під час ведення земельно-кадастрової документації.

1.3 Зміна геодезичних координат при переході між референцними еліпсоїдами

Однією з ключових задач сучасної геодезії є забезпечення коректного переходу між різними системами координат, що базуються на відмінних геодезичних даних та референц-еліпсоїдах. У процесі трансформації просторових даних між локальними та геоцентричними системами координат відбувається зміна геодезичних координат точок, що обумовлено різницею параметрів еліпсоїдів, положенням центрів систем координат, орієнтацією координатних осей та особливостями математичної моделі Землі.

Референц-еліпсоїд є математичною поверхнею, яка використовується для апроксимації форми Землі та служить основою побудови геодезичної

системи координат. Кожен еліпсоїд характеризується власними геометричними параметрами, зокрема великою піввіссю a , малою піввіссю b , стисненням f та ексцентриситетом e . Відмінність між параметрами еліпсоїдів призводить до того, що одна й та сама точка земної поверхні матиме різні значення геодезичних координат у різних системах координат.

Особливо актуальним це питання є під час переходу від локальних систем координат, побудованих на еліпсоїді Красовського, до сучасних геоцентричних систем координат, зокрема WGS 84 та UCR-2000, які використовуються у супутниковій геодезії та GNSS-технологіях. У таких випадках виникає необхідність виконання точних координатних перетворень із урахуванням параметрів обох систем координат.

При переході між різними референц-еліпсоїдами змінюються:

- геодезична широта точки;
- геодезична довгота;
- еліпсоїдальна висота;
- просторові прямокутні координати;
- результати визначення довжин, площ та просторових характеристик об'єктів.

Для забезпечення узгодженості геодезичних даних використовуються спеціальні математичні моделі трансформації координат, які дозволяють обчислити величини змін координат між системами відліку. Основою таких перетворень є перехід від геодезичних координат до просторових прямокутних координат та подальше застосування параметричних моделей трансформації.

Прямокутні геоцентричні координати точки визначаються співвідношеннями: [2, 9, 19, 22]:

$$dB = \Delta B_{CK2-CK1} = B_{CK2} - B_{CK1} = \frac{1}{M} (-(\Delta X \cos L + \Delta Y \sin L) \sin B + \Delta Z \cos B) + \\ + (R_X \sin L - R_Y \cos L)(1 + e^2 \cos 2B) - \frac{1}{2} \mu \cdot e^2 \sin 2B + \\ + \frac{\sin 2B \cdot N}{2M} \left(\frac{\Delta a}{a} e^2 + \left(\frac{N^2}{a^2} + 1 \right) \frac{\Delta e^2}{2} \right) \quad , \quad (1)$$

$$(L_{CK2} - L_{CK1}) \cos B = \frac{1}{N} (-\Delta X \sin L + \Delta Y \cos L) - \\ - \sin B(1 - e^2)(R_X \cos L + R_Y \sin L) + R_Z \cos B \quad , \quad (2)$$

де $B_{CK1}, L_{CK1}, B_{CK2}, L_{CK2}$ - геодезичні широта, довгота точки на першому (в системі координат СК1) і на другому референцних еліпсоїда (в системі координат СК2); $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ - лінійні параметри трансформації Гельмерта [9, 14, 18] при переході від СК1 до СК2, R_X, R_Y, R_Z - кутові параметри трансформації Гельмерта при переході від СК1 до СК2, які згідно з [24], мають назву повороту позиційного вектору («position vector rotation»), μ - масштабний множник; B, L - геодезичні широта, довгота точки на еліпсоїді в одній з систем координат, наприклад СК1; M - радіус кривизни меридіана, N - радіус кривизни першого вертикалу, a - велика піввісь, e^2 - квадрат першого ексцентриситету одного з еліпсоїдів, наприклад, еліпсоїда системи координат СК1; $\Delta a, \Delta e^2$ - різниця між великими півсями та різниця між квадратами ексцентриситетів другої та першої систем координат, а саме:

$$\Delta a = a_{CK2} - a_{CK1}, \quad \Delta e^2 = e_{CK2}^2 - e_{CK1}^2. \quad (3)$$

Так як в системах координат СК-63 і УСК-2000 використовується один еліпсоїд - еліпсоїд Красовського з параметрами [5, 11]:

$$a = 6378245(\text{м}), \quad e^2 = 0.006\,69342\,1623,$$

то

$$\Delta a = a_{УСК2000} - a_{СК63} = 0, \quad \Delta e^2 = e_{УСК2000}^2 - e_{СК63}^2 = 0 \quad . \quad (4)$$

У цьому випадку рівняння (1) запишеться так:

$$dB = \frac{1}{M}(-(\Delta X \cos L + \Delta Y \sin L) \sin B + \Delta Z \cos B) + \\ + (R_X \sin L - R_Y \cos L)(1 + e^2 \cos 2B) - \frac{1}{2} \mu \cdot e^2 \sin 2B \quad . \quad (5)$$

Оскільки системи координат СК-63 та СК-42 побудовані на єдиній геодезичній основі та мають спільну просторову прямокутну систему координат «Пулково 1942 року», їх параметри просторової трансформації є ідентичними. Обидві системи використовують еліпсоїд Красовського та однакові принципи орієнтування координатної основи, що дозволяє застосовувати єдині параметри семипараметричного перетворення Гельмерта під час переходу до сучасних геоцентричних систем координат.

У сучасній геодезичній практиці трансформація координат між локальними та глобальними системами координат виконується за допомогою просторових параметричних моделей, серед яких найбільш поширеним є семипараметричне перетворення Гельмерта. Даний метод забезпечує перехід між системами координат шляхом врахування трьох лінійних зміщень, трьох кутів повороту координатних осей та масштабного параметра. Використання цієї моделі дозволяє забезпечити високий рівень узгодженості просторових даних під час інтеграції локальних геодезичних систем із сучасними глобальними супутниковими технологіями.

Параметри трансформації між системами СК-63 (СК-42) та УСК-2000 можуть бути визначені шляхом послідовного використання проміжної глобальної системи координат WGS 84. Такий підхід є найбільш поширеним у сучасній супутниковій геодезії, оскільки система WGS-84 використовується як базова координатна основа для GNSS-спостережень та міжнародних геодезичних мереж.

Отримання параметрів трансформації здійснюється у два основні етапи:

- визначення параметрів переходу між системами СК-63 (СК-42) та WGS-84;
- визначення параметрів переходу між системами WGS-84 та УСК-2000.

Подальше комбінування цих параметрів дозволяє отримати узагальнену модель трансформації між локальною системою координат СК-63 та сучасною геоцентричною системою координат УСК-2000. Такий метод забезпечує математичну узгодженість координатних перетворень та дозволяє мінімізувати систематичні похибки при інтеграції геодезичних даних різних періодів створення.

Параметри трансформації між системами СК-42 та WGS-84 для території України наведені у міжнародному геодезичному реєстрі EPSG, який використовується для стандартизації координатних систем та параметрів їх перетворення. Зокрема, відповідні параметри представлені у базі даних [EPSG Registry](#). Використання офіційних параметрів EPSG забезпечує сумісність геодезичних даних із сучасними геоінформаційними системами, супутниковими технологіями та міжнародними стандартами просторового позиціонування.

Параметри переходу між системами WGS 84 та УСК-2000 визначаються на основі результатів високоточних GNSS-спостережень та державної геодезичної мережі України. Їх використання дозволяє забезпечити високу точність координатних трансформацій та узгодженість просторових даних у процесі переходу до сучасної геоцентричної системи координат.

Необхідність використання точних параметрів трансформації обумовлена тим, що навіть незначні похибки при переході між системами координат можуть призводити до суттєвих зміщень координат точок, особливо при виконанні високоточних кадастрових, інженерно-геодезичних та моніторингових робіт. Такі зміщення можуть впливати на визначення площ земельних ділянок, положення меж, результати просторового аналізу та коректність функціонування геоінформаційних систем.

У зв'язку з цим застосування параметрів трансформації Гельмерта є важливою складовою забезпечення точності та узгодженості геодезичних даних при переході від локальних систем координат до сучасних геоцентричних систем, орієнтованих на використання супутникових технологій та міжнародних стандартів просторового позиціонування.

Таблиця 1 – Обчислення параметрів Гельмерта для трансформації між системами СК-63 (СК-42) та УСК-2000

Параметр	від СК-63 (СК-42) до WGS-84	від WGS-84 до УСК-2000	від СК-63 (СК-42) до УСК-2000
Епоха	-	2005	-
ΔX (м)	25,0	-24,3234	0,6766
ΔY (м)	-141,0	121,3708	-19,6292
ΔZ (м)	-78,5	75,8275	-2,6725
R_x (arc sec)	0,000	0,00000	0,000
R_y (arc sec)	0,350	0,00000	0,350
R_z (arc sec)	0,736	0,00000	0,736
μ (ppb ¹)	0,0	1,74	1,74

Для визначення параметрів трансформації між системами координат СК-63 та УСК-2000 було використано підхід, заснований на правилах комбінування параметрів семипараметричного перетворення Гельмерта. Відповідно до методики, наведеної у наукових джерелах, у випадку коли кутові параметри повороту координатних осей та масштабний коефіцієнт є величинами першого порядку малості, допускається спрощене обчислення результуючих параметрів трансформації шляхом їх алгебраїчного підсумовування.

¹ ppb=10⁻⁹.

Згідно з даним підходом, параметри переходу між початковою та кінцевою системами координат можуть бути визначені як сума відповідних параметрів трансформації між усіма проміжними системами координат, приведеними до однієї часової епохи. Такий метод дозволяє реалізувати послідовну координатну трансформацію через проміжну глобальну систему координат WGS 84 та забезпечує узгодженість просторових даних при переході від локальних координатних систем до сучасних геоцентричних систем відліку.

Практичне застосування зазначеного підходу дає можливість отримати параметри трансформації між системами СК-63 та УСК-2000 без необхідності безпосереднього визначення всіх параметрів за результатами окремих геодезичних спостережень. Це є особливо важливим для кадастрових та інженерно-геодезичних робіт, де необхідно забезпечити просторову сумісність великого масиву архівних та сучасних координатних даних.

Під час аналізу впливу координатних перетворень на геометричні характеристики земельних ділянок особливе значення має оцінка зміни площ при переході між різними системами координат. Для цього використовується математичний апарат диференціальної геометрії поверхонь, зокрема визначення елементарної площі сфероїдичної трапеції на поверхні референц-еліпсоїда.

Нескінченно малий елемент площі на поверхні еліпсоїда визначається через параметри кривизни та геодезичні координати точки. Використання даного підходу дозволяє врахувати геометричні особливості референц-еліпсоїда та оцінити вплив зміни системи координат на результати визначення площ земельних ділянок. Це є важливим етапом дослідження точності та узгодженості геодезичних даних при переході до геоцентричних систем координат, оскільки навіть незначні зміни координат поворотних точок можуть спричиняти появу розбіжностей у площах об'єктів землеустрою [5, 21]:

$$dP = MN \cos B dB dL, \quad (6)$$

Є кілька точних і наближених формул [5, 21] для розрахунку площі сфероїдичної трапеції між двома меридіанами з довготами L_1, L_2 і паралелями з широтами B_1, B_2 , отриманих інтегруванням рівняння (6). Однак, для розрахунку невеликих ділянок, розміром в декілька гектарів, можна у формулі (6) замінити диференціали кінцевими різницями і скориставшись теоремою Коши про середнє та формулами зв'язку радіусів кривизна M, N з геодезичної широтою [5, 21]:

$$M = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 B)^{\frac{3}{2}}}, \quad N = \frac{a}{(1-e^2 \sin^2 B)^{\frac{1}{2}}}, \quad (7)$$

записати:

$$P \cong \frac{a^2(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 B_{cp})^2} \cos B_{cp} \Delta B \Delta L, \quad (8)$$

де

$$\Delta B = B_2 - B_1, \quad B_{cp} = \frac{1}{2}(B_2 + B_1), \quad \Delta L = L_2 - L_1. \quad (9)$$

Для ділянки в системі координат СК-63 рівняння (8) запишеться так:

$$P_{СК63} \cong \frac{a^2(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 B_{cp})^2} \cos B_{cp} \Delta B_{СК63} \Delta L_{СК63}, \quad (10)$$

де

$$\Delta B_{СК63} = B_2 - B_1, \quad \Delta L_{СК63} = L_2 - L_1. \quad (11)$$

Аналогічно, для ділянки в системі координат УСК-2000:

$$P_{УСК2000} = \frac{a^2(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 (B_{cp} + dB))^2} \cos(B_{cp} + dB) \Delta B_{УСК2000} \Delta L_{УСК2000}, \quad (12)$$

де

$$\Delta B_{УСК2000} = (B_2 + dB_2) - (B_1 + dB_1), \Delta L_{УСК2000} = (L_2 + dL_2) - (L_1 + dL_1), \quad (13)$$

Оскільки під час трансформації координат між різними системами координат величини поправок, визначені за відповідними формулами перетворення, змінюються плавно та мають незначну варіацію в межах невеликої території, їх вплив на координати точок земельної ділянки можна вважати практично однаковим. Для компактних за площею земельних ділянок параметри трансформації діють майже рівномірно, забезпечуючи близькі значення зміщень для всіх поворотних точок межі.

Це пояснюється тим, що в межах локальної території зміни геодезичних параметрів, пов'язаних із переходом між системами координат, мають повільний характер і не спричиняють суттєвих диференціальних спотворень між окремими точками об'єкта. У результаті вектори зміщення координат для всіх точок земельної ділянки мають практично однаковий напрямок та близькі величини.

За таких умов для невеликих земельних ділянок допускається припущення про рівномірний характер координатних змін, що значно спрощує аналіз впливу трансформації координат на геометричні характеристики об'єкта, зокрема на визначення площі, довжин сторін та положення меж. Це також свідчить про те, що основний вплив переходу до геоцентричної системи координат проявляється не у локальних деформаціях самої ділянки, а у загальному зміщенні її просторового положення відносно нової координатної основи.

$$dB_1 \cong dB_2, dL_1 \cong dL_2, \quad (14)$$

$$\Delta B_{УСК2000} \cong \Delta B_{СК63} = \Delta B, \Delta L_{УСК2000} \cong \Delta L_{СК63} = \Delta L. \quad (15)$$

Різниця площ між ділянкою на еліпсоїді в системі координат УСК-2000 і тією ж ділянкою на еліпсоїді в системі координат СК-63, відповідно до формул (10, 12, 15) дорівнює:

$$\delta P^{(1)} = P_{УСК2000} - P_{СК63} \cong \frac{a^2(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 B)^2} 2 \sin\left(\frac{2B_{cp} + dB}{2}\right) \sin\left(\frac{-dB}{2}\right) \Delta B \Delta L. \quad (16)$$

Якщо припустити, що dB - величина першого порядку малості, то ігнорування величин другого порядку малості в рівнянні (16) дає:

$$\delta P^{(1)} \cong -dB \frac{a^2(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 B)^2} \sin B_{cp} \Delta B \Delta L, \quad (17)$$

або, з урахуванням формули (10),

$$\delta P^{(1)} \cong -dB \tan B_{cp} P_{СК63}. \quad (18)$$

У формулі (18) dB визначається за допомогою рівняння (5) з використанням параметрів трансформації від СК-63 до УСК-2000, представлених в табл 1.

Для обчислення величин $\delta P^{(1)}$ на всю територію України був сформований програмний код на мові Visual Basic для Excel, представлений в Додатку А. Величина $\delta P^{(1)}$ обчислювалась для ділянки площею в 1 гектар в системі СК-63 ($P_{СК63} = 1$ гектар). На рис. 1 показаний ізолінійний графік величини $\delta P^{(1)}$. Ізолінії проведено через 0,001 м². Згідно з цим графіком найбільше значення $\delta P^{(1)}$, рівне 0.012 м² має місце на заході України, найменше - 0.001 м² - на сході.

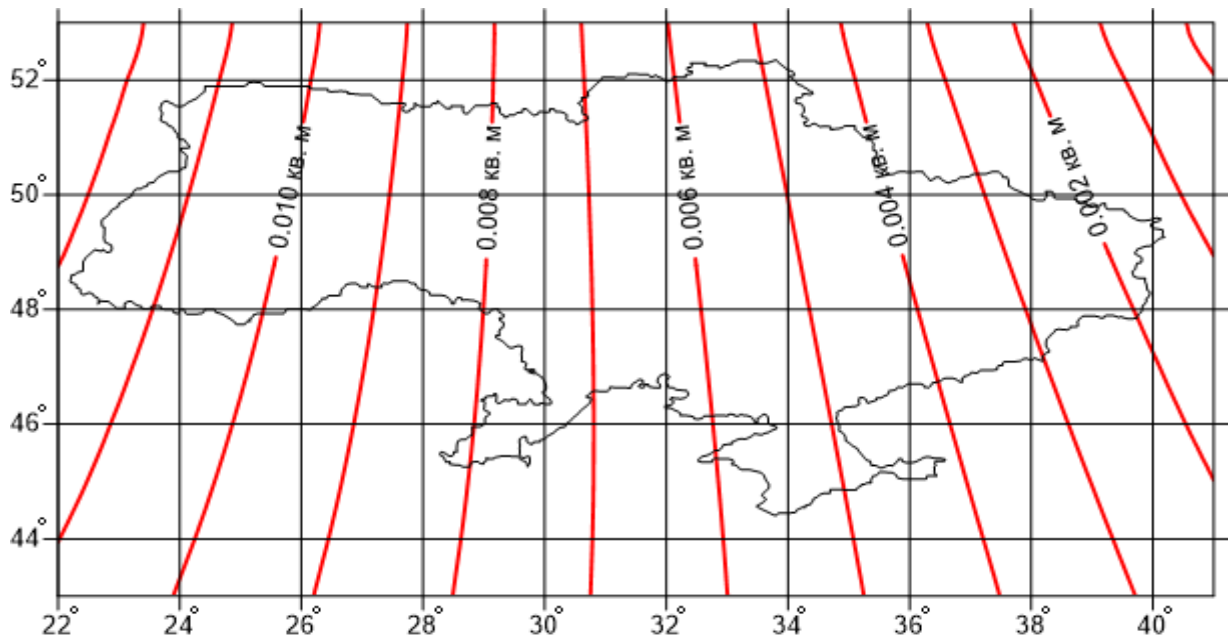


Рис. 1 – Ізолінії $\delta P^{(1)}$, обчислені для ділянки площею в 1 гектар на територію України

1.4 Дослідження впливу координатних деформацій на точність визначення площ земельних ділянок при переході до геоцентричної системи координат

Деформації координатної основи, що виникають унаслідок систематичних та випадкових похибок систем координат СК-63 і СК-42 та проявляються під час переходу до сучасної геоцентричної системи координат УСК-2000, були детально проаналізовані у наукових дослідженнях, присвячених оцінці точності трансформації геодезичних даних. Проведені дослідження свідчать про наявність просторових деформацій між старими локальними системами координат і сучасною державною геоцентричною системою координат, що пов'язано з особливостями побудови геодезичних мереж попередніх поколінь, накопиченням похибок вимірювань та локальними неточностями координатної основи [6].

Встановлено, що максимальні розбіжності між просторовими прямокутними координатами точок у системах СК-63 (СК-42) та УСК-2000 можуть досягати приблизно 3,5 м [6]. Найбільші значення деформацій спостерігаються у прикордонних районах території України, де вплив накопичених похибок геодезичної мережі є найбільш вираженим. У

центральної частині території держави величина деформацій є мінімальною та наближається до нульових значень [6].

Характер зміни деформацій має плавний та безперервний вигляд. Зі збільшенням віддаленості від центральної частини країни до периферійних районів величина координатних зміщень поступово зростає без різких стрибків або локальних розривів. Такий характер розподілу деформацій свідчить про систематичну природу похибок старих систем координат і підтверджує необхідність врахування регіональних особливостей трансформації при переході до сучасної геоцентричної системи координат.

Наявність зазначених деформацій безпосередньо впливає на точність визначення просторового положення земельних ділянок, узгодженість кадастрових даних, результати визначення площ та коректність інтеграції архівної геодезичної інформації з сучасними GNSS-вимірюваннями. Саме тому під час виконання координатних перетворень між системами СК-63 та УСК-2000 необхідно враховувати вплив локальних деформацій координатної основи для забезпечення високої точності та достовірності геодезичних даних (див. рис. 2).

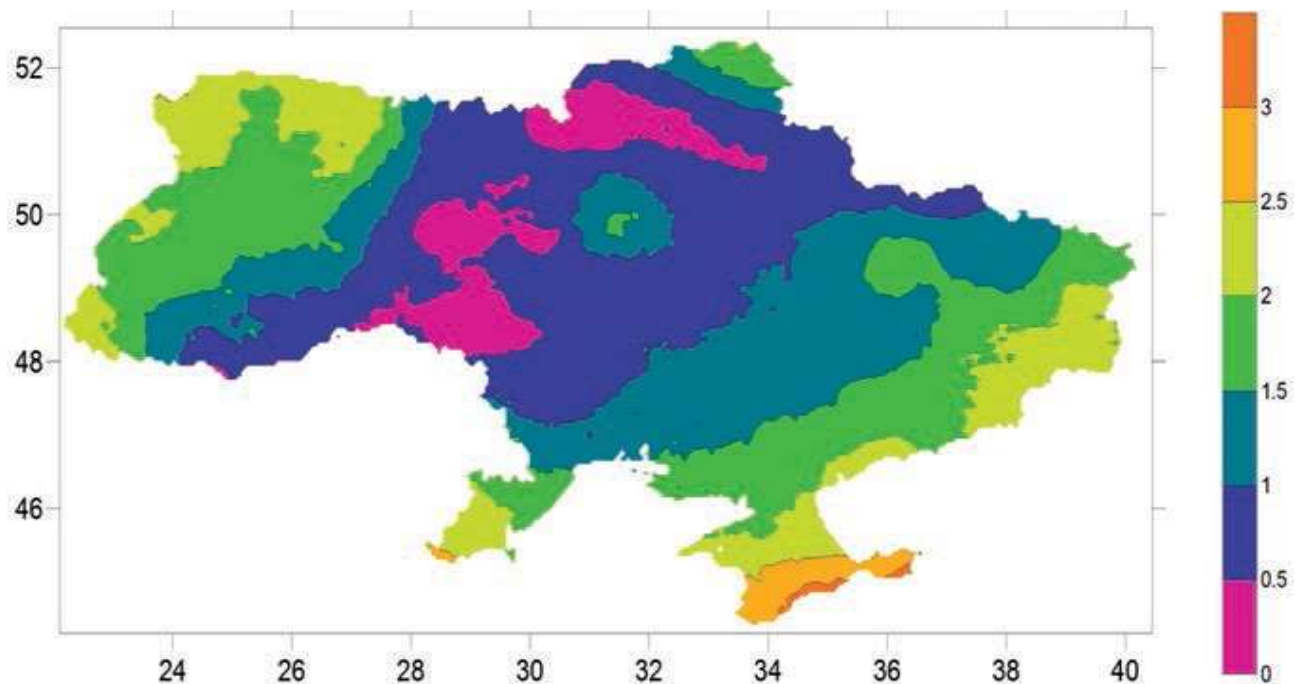


Рис. 2 – Ізолінії деформацій системи СК-42 по відношенню до системи УСК-2000 згідно [6]

Найбільший вплив деформацій на координати точок земельної ділянки має місце в тих регіонах країни, де ухил поверхні деформацій максимальний, тобто, в областях, в яких відстань між ізолініями рівних деформацій мінімальна.

Згідно зі схемою деформацій системи УСК-2000 щодо СК-42 (СК-63), представленої в [6] та даними рис. 2, найбільший ухил поверхня деформацій має в центрі країни в Черкаській області. Відстань між ізолініями деформацій в цьому районі мінімальна, визначена за схемою [6] вийшла рівною 18 132 м. Ухил, який відповідає цієї відстані рівний $2.76E-05$.

Площа ділянки за координатами граничних точок обчислюється за допомогою відомої формули Гаусса [25]:

$$P = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N X_j (Y_{j+1} - Y_{j-1}), \quad (19)$$

де N - кількість граничних точок ділянки, X_j, Y_j - координати j - тої граничної точки ділянки.

Так як площа інваріантна стосовно прямокутної системі координат на площині, виберемо її так, щоб вісь X співпадала з напрямком максимального ухилу поверхні деформації, вісь Y була перпендикулярна цьому напрямку. В цьому випадку деформації будуть діяти тільки на координати X земельної ділянки. Координати Y залишаться незмінними.

Координати X_j^D деформованої ділянки можна обчислити за формулою:

$$X_j^D = X_j + d_j, \quad (20)$$

де X_j - координати недеформованої ділянки, d_j - величина деформації в j - той точці.

Площа деформованої ділянки визначається з рівняння:

$$P^D = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N X_j^D (Y_{j+1} - Y_{j-1}) = P + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N d_j (Y_{j+1} - Y_{j-1}). \quad (21)$$

де P - площа недеформованої ділянки.

Таким чином, спотворення площі, викликане деформаціями між системами координат, можна визначити з рівняння:

$$\delta P^{(2)} = P^D - P = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N d_j (Y_{j+1} - Y_{j-1}). \quad (22)$$

Припускаючи, що деформації всередині ділянки діють лінійно, ухил i - постійна величина, можна записати:

$$d_j = i \cdot X_j + D, \quad (23)$$

де D - величина деформації на початку координат для $X = 0$.

Підставимо (23) в (21), отримаємо

$$\delta P^{(2)} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N (i \cdot X_j + D)(Y_{j+1} - Y_{j-1}) = i \cdot P. \quad (24)$$

Для ділянки площею 1 га, розташованої вздовж лінії максимального нахилу поверхні деформації, зміна площі дорівнює:

$$\delta P^{(2)} = 0.276 (\text{м}^2).$$

Значення $0,276 \text{ м}^2$ - максимальне значення зміни площі ділянки 1 га, викликане деформаціями між системами координат УСК-2000 і СК-63 (СК-42). На жаль, знак деформації не вказується в [6], тому неможливо визначити збільшується або зменшується площа в результаті деформації.

1.5 Аналіз зміни площ земельних ділянок унаслідок проекційних спотворень при переході до геоцентричної системи координат

Масштаб довжин в проекції Гаусса-Крюгера для зони шириною не більше 6 градусів по довготі, згідно [5, 23], дорівнює.

$$m \cong 1 + \frac{1}{2}(L - L_0)^2 \cos^2 B(1 + e'^2 \cos^2 B), \quad (25)$$

де L_0 - довгота осьового меридіана, вздовж якого масштаб довжин дорівнює 1; e'^2 - квадрат другого ексцентриситету еліпсоїда, рівний для еліпсоїда Красовського [5]:

$$e'^2 = 0,006\,73852\,5415.$$

Масштаб площі в проекції Гаусса-Крюгера, як і в будь-який інший конформній проекції [5], дорівнює:

$$p \cong 1 + (L - L_0)^2 \cos^2 B(1 + e'^2 \cos^2 B). \quad (26)$$

Як відомо [5], масштаб площі - це відношення площі елементарної фігури в проекції в певній системі координат, до площі елементарної фігури на еліпсоїді в тій же системі. Для еліпсоїда в системі УСК-2000 масштаб площі дорівнює

$$p_{УСК2000} = \frac{dP_{пл, УСК2000}}{dP_{ел, УСК2000}} \cong 1 + (L_{УСК2000} - L_{0, УСК2000})^2 \cos^2 B_{УСК2000}(1 + e'^2 \cos^2 B_{УСК2000}). \quad (27).$$

У рівнянні (27) $dP_{пл, УСК2000}, dP_{ел, УСК2000}$ - площа елементарної фігури на площині і на еліпсоїді в системі УСК-2000, відповідно, $B_{УСК2000}, L_{УСК2000}$ - координати точки на еліпсоїді, широта і довгота, в системі УСК-2000, $L_{0, УСК2000}$

- довгота осового меридіана зони в проекції Гаусса-Крюгера в системі УСК-2000.

Аналогічно, для масштабу площі в системі СК-63

$$p_{CK63} = \frac{dP_{nl, CK63}}{dP_{ell, CK63}} \cong 1 + (L_{CK63} - L_{0, CK63})^2 \cos^2 B_{CK63} (1 + e'^2 \cos^2 B_{CK63}). \quad (28)$$

Використовуючи властивості тригонометричних і зворотних функцій, на підставі формул (1-2) можемо записати для УСК-2000 і СК-63

$$|B_{UCS2000} - B_{CK63}| < \frac{1}{a(1-e^2)} (|\Delta X| + |\Delta Y| + |\Delta Z|) + (|R_X| + |R_Y|)(1+e^2) + \frac{1}{2}|\mu|e^2, \quad (29)$$

$$|L_{UCS2000} - L_{CK63}| < \frac{1}{\cos B_{\max}} \left(\frac{1}{a} (|\Delta X| + |\Delta Y|) + (|R_X| + |R_Y| + |R_Z|) \right). \quad (30)$$

$B_{\max}$ - максимальне значення широти для даної території. Зокрема, для України максимальне значення широти дорівнює:

$$B_{\max} \approx 52,4^{\circ}.$$

Використання цієї величина та даних, представлених в табл.1, дає такі оцінки:

$$B_{YCK2000} - B_{CK63} < 5,3351E-06 \text{ (рад)} = 1,1 \text{ (сек)},$$

$$(L_{CK2} - L_{CK1}) < 1,3828E-05 \text{ (рад)} = 2,9 \text{ (сек)}.$$

Нехтуючи цими величинами можна записати:

$$B_{УСК2000} = B_{СК63} = B, \quad L_{УСК2000} = L_{СК63} = L. \quad (31)$$

Як показано в розд. 2, відмінність між площею ділянки розміром в 1 га на еліпсоїді, зв'язана з неспівпаданням параметрів Гельмерта систем УСК-2000 і СК-63, становить не більше 0.012 м². Як буде показано нижче, відмінність між площею ділянки в проекції Гаусса-Крюгера в системі УСК2000 і в системі СК63 на порядок більше цієї величини, тому, в даному випадку, нехтуючи величиною 0.012 м², можна прирівняти площу ділянки на еліпсоїді в системі УСК-2000 до площі ділянки на еліпсоїді в системі СК-63 (СК-42), а саме:

$$dP_{ell, УСК2000} \cong dP_{ell, СК63}. \quad (32)$$

Розділивши рівняння (29) на (30) з урахуванням (33-34), отримаємо:

$$\frac{dP_{nl, УСК2000}}{dP_{nl, СК63}} \cong \frac{1 + (L - L_{0, 2000})^2 \cos^2 B (1 + e'^2 \cos^2 B)}{1 + (L - L_{0, СК63})^2 \cos^2 B (1 + e'^2 \cos^2 B)}. \quad (33)$$

Для невеликих ділянок землі елементи площі можна замінити самими площами, тобто:

$$\frac{P_{УСК2000}}{P_{СК63}} \cong \frac{1 + (L - L_{0, 2000})^2 \cos^2 B (1 + e'^2 \cos^2 B)}{1 + (L - L_{0, СК63})^2 \cos^2 B (1 + e'^2 \cos^2 B)}. \quad (34)$$

В цьому випадку B, L - середні геодезичні координати граничних точок земельної ділянки.

Так як $(L_{СК63} - L_{0, СК63})^2 \cos^2 B_{СК63} (1 + e'^2 \cos^2 B_{СК63})$ - величина першого порядку малості набагато менша 1, то відкидаючи величини другого порядку малості, напишемо:

$$\frac{P_{УСК2000}}{P_{СК63}} \cong \left(1 + (L - L_{0,2000})^2 \cos^2 B(1 + e'^2 \cos^2 B)\right) \left(1 - (L - L_{0,63})^2 \cos^2 B(1 + e'^2 \cos^2 B)\right). \quad (35)$$

Розкриваючи дужки і залишаючи тільки величини першого порядку малості, після тотожних перетворень, отримаємо:

$$P_{2000} \cong (1 + 2(L_{0,2000} - L_{0,63}) \cdot (L_m - L) \cos^2 B(1 + e'^2 \cos^2 B)) P_{63}, \quad (36)$$

де

$$L_m = \frac{L_{0,2000} + L_{0,63}}{2}. \quad (37)$$

З огляду на формулу (36), різниця між площею ділянки в системі УСК-2000 і в системі СК-63 в проекції Гаусса-Крюгера, може бути знайдена:

$$\Delta P^{(3)} = P_{2000} - P_{63} \cong 2(L_{0,2000} - L_{0,63}) \cdot (L_m - L) \cos^2 B(1 + e'^2 \cos^2 B) P_{63}. \quad (38)$$

Довготи у формулі (38) використовуються в радіанах.

На підставі формули (38) можна зробити висновок, що відмінність в площі, викликану властивостями проекції Гаусса-Крюгера можна було б уникнути, якби осьові меридіани зон в системах УСК-2000 і СК-63 збігалися. Осьові меридіани зон в проекції Гаусса-Крюгера для вищеназваних систем рівні:

$$L_{0,63} : 23.5^0, 26.5^0, 29.5^0, 32.5^0, 35.5^0, 38.5^0;$$

$$L_{0,2000} : 21^0, 24^0, 27^0, 30^0, 33^0, 36^0, 39^0.$$

На рис 4 представлений графік зміни $\delta P^{(3)}$ в залежності від довготи L для ділянки землі площею $P_{63} = 1$ гектар вздовж паралелі з широтою $B = 49^\circ$ і для довгот від 20 до 41 градусів. У нижній частині графіка показані зони і осьові меридіани (червоним кольором) системи СК-63, у верхній - УСК-2000.

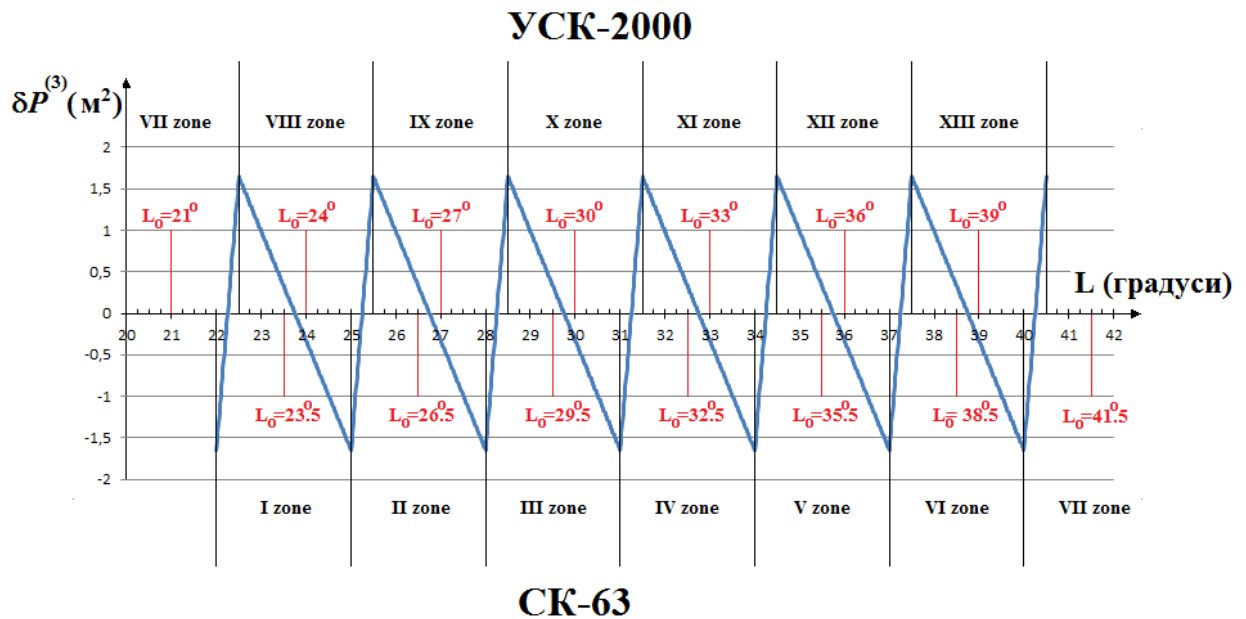


Рис. 4 - Графік зміни $\delta P^{(3)}$ в залежності від довготи вздовж паралелі з широтою $B = 49^\circ$ для ділянки площею в 1 га в системі СК-63

Як видно з графіка екстремальні відмінності між площами в системах координат УСК-2000 і СК-63 мають місце на межі зон. Причому, на кордонах зон системи УСК-2000 має місце максимальне значення $\delta P^{(3)}$, рівне 1.64 м^2 , на кордонах зон системи СК-63 - мінімальне значення, рівне -1.64 м^2 .

Екстремальні значення $\delta P^{(3)}$ залежать від широти. Згідно (38), чим південніше паралель, тим більше екстремальні значення. Екстремальні значення в залежності від широти, можна отримати, якщо в формулу (38) підставити добуток величин $2(L_{0,2000} - L_{0,63}) \cdot (L_m - L)$ в тому випадку, коли L дорівнює будь-якому з осьових меридіанів. Підставляючи конкретні значення $L_{0,2000}$, $L_{0,63}$, L_m , L , в формулу (40), отримаємо:

$$\delta P_{\text{sup}}^{(3)} = \pm 3.807 \cos^2 B (1 + e'^2 \cos^2 B) (m^2) P_{pl, \text{СК63}} \cdot \quad (39)$$

Якщо площа ділянки становить $P_{pl,CS63} = 1$ гектар, то для $B = 44^{\circ}20'$ (найпівденніша широта України) $\delta P_{sup}^{(3)} = \pm 1,95 \text{ м}^2$. Аналогічно, для $B = 52^{\circ}30'$ (найпівнічніша широта України) $\delta P_{sup}^{(3)} = \pm 1,41 \text{ м}^2$.

Таким чином, найбільша зміна площі ділянки пов'язана з властивостями проекції Гауса-Крюгера. При використанні системи UCS-2000 це значення знаходиться в межах:

$$|\delta P^{(3)}| \leq 1.95 \text{ м}^2. \text{ для ділянки площею - 1 га.}$$

У самому несприятливому випадку загальна величина зміни площі ділянки, викликана переходом від системи координат СК-63 до системи координат УСК-2000 дорівнює:

$$\delta P = \delta P^{(1)} + \delta P^{(2)} + \delta P^{(3)} = 1,95 + 0,28 + 0,01 = 2,24 \text{ м}^2.$$

У процесі переходу від локальної системи координат СК-63 до сучасної геоцентричної системи координат УСК-2000 виникає проблема розбіжності площ земельних ділянок, яка має як технічний, так і юридичний характер. Враховуючи те, що площа земельної ділянки у землевпорядній та кадастровій документації традиційно фіксується з точністю до 0,0001 га, навіть незначні зміни координат поворотних точок після трансформації можуть призводити до появи відмінностей у значеннях площ між різними системами координат.

Особливо помітними такі розбіжності стають для земельних ділянок площею понад 0,1 га, розташованих у районах, наближених до меж координатних зон проекції Гауса-Крюгера. Це пояснюється тим, що картографічна проекція, яка використовується у відповідних системах координат, має властивість викликати спотворення довжин, кутів та площ, величина яких залежить від положення об'єкта відносно осьового меридіана координатної зони. У результаті одна й та сама земельна ділянка після переходу до іншої системи координат може мати дещо відмінне числове значення площі.

На практиці це створює складнощі під час ведення державного земельного кадастру, оформлення технічної документації та реєстрації прав власності на земельні ділянки. З метою уникнення юридичних суперечностей та забезпечення узгодженості кадастрових даних державні реєстратори часто вимагають, щоб площі земельних ділянок у документації, сформованій у системах СК-63 та УСК-2000, залишалися однаковими. У таких випадках площа, обчислена у новій системі координат, фактично прирівнюється до значення площі, визначеної у старій системі координат, незалежно від реальних результатів трансформації координат.

Подібний підхід свідчить про те, що навіть після офіційного припинення використання системи СК-63 на нормативному рівні її вплив продовжує зберігатися у кадастровій практиці через збереження історичних значень площ земельних ділянок. Таким чином, локальна система координат СК-63 фактично продовжує існувати у структурі кадастрових даних, насамперед через прив'язку юридично значущих характеристик земельних ділянок до раніше сформованої документації.

Проблема зміни площ при переході між системами координат є характерною не лише для України, а й для інших держав, які здійснюють модернізацію національних геодезичних систем. У сучасних умовах розвитку супутникової геодезії більшість країн переходять від локальних негеоцентричних систем координат до сучасних геоцентричних систем, сумісних із глобальними навігаційними супутниковими системами GNSS. Основною причиною такого переходу є необхідність забезпечення високої точності просторових даних та їх інтеграції у міжнародний геоінформаційний простір.

При переході до нових геоцентричних систем координат виникають аналогічні проблеми, пов'язані зі зміною площ земельних ділянок та необхідністю забезпечення узгодженості кадастрової інформації. Проте у випадках, коли старі та нові системи координат використовують однакові

параметри картографічної проекції та спільні осьові меридіани координатних зон, вплив проекційних спотворень на зміну площ суттєво зменшується.

У такій ситуації основний вплив на результати визначення площ мають:

- відмінності між центрами систем координат;
- зміна орієнтації координатних осей;
- різниця параметрів референц-еліпсоїдів;
- особливості геодезичних датумів;
- локальні деформації геодезичної основи.

Саме ці фактори визначають величину зміщення координат точок після трансформації та впливають на узгодженість геодезичних даних у різних системах координат.

При цьому зміна площ земельних ділянок, обумовлена переходом між системами координат, зазвичай має регулярний і монотонний характер. Це означає, що величина відмінностей змінюється поступово залежно від просторового положення ділянки та може бути описана відповідними математичними залежностями. Наявність такої закономірності дозволяє прогнозувати величину можливих змін площ і враховувати їх під час виконання кадастрових, землеустроювальних та інженерно-геодезичних робіт.

Таким чином, проблема зміни площ земельних ділянок при переході до геоцентричних систем координат є важливим аспектом забезпечення точності та узгодженості геодезичних даних. Її вирішення потребує комплексного врахування впливу координатних трансформацій, параметрів референц-еліпсоїдів, деформацій координатної основи та властивостей картографічних проекцій з метою забезпечення достовірності кадастрової інформації та стабільності земельно-правових відносин.

ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ

Проведений аналіз впливу переходу від локальної системи координат СК-63 до сучасної геоцентричної системи координат УСК-2000 дозволив встановити основні чинники, які впливають на точність та узгодженість геодезичних даних під час трансформації координат земельних ділянок. Отримані результати свідчать про те, що зміна геометричних характеристик земельних ділянок при переході до геоцентричної системи координат має комплексний характер та обумовлена одночасним впливом декількох факторів: відмінністю геодезичних датумів і параметрів референц-еліпсоїдів, наявністю деформацій координатної основи, а також властивостями картографічної проекції Гаусса–Крюгера.

У результаті дослідження встановлено, що вплив відмінностей між центрами просторових прямокутних координат, орієнтацією координатних осей та параметрами референц-еліпсоїдів систем СК-63 і УСК-2000 на зміну площ земельних ділянок є порівняно незначним. Максимальна величина зміни площі, спричинена саме цими факторами, становить близько $0,012 \text{ м}^2$, що практично не впливає на результати кадастрових обчислень та не створює суттєвих розбіжностей у межах земельно-кадастрової документації.

Більш відчутний вплив на результати визначення площ мають локальні деформації координатної основи, які сформувалися внаслідок систематичних і випадкових похибок старих геодезичних мереж, побудованих у системах СК-63 та СК-42. Аналіз показав, що деформаційні зміщення можуть спричиняти зміну площ земельних ділянок до $0,277 \text{ м}^2$. Такі зміни вже можуть бути помітними при виконанні високоточних кадастрових та інженерно-геодезичних робіт, особливо для великих земельних ділянок або об'єктів, розташованих у районах із підвищеним рівнем координатних деформацій.

Разом із тим результати дослідження підтвердили, що найбільший вплив на невідповідність площ земельних ділянок у системах координат СК-63 та

УСК-2000 має саме картографічна проекція Гаусса–Крюгера. Властивість даної проекції викривляти площі залежно від положення об'єкта відносно осевого меридіана координатної зони спричиняє найбільш суттєві зміни геометричних параметрів земельних ділянок після трансформації координат. У межах проведеного дослідження встановлено, що різниця площ, обумовлена виключно проекційними спотвореннями, може досягати 1,95 м², що значно перевищує вплив інших факторів.

Отримані результати свідчать про те, що саме проекційні деформації є основною причиною розбіжностей між площами земельних ділянок у локальних та геоцентричних системах координат. Це особливо важливо для ведення державного земельного кадастру, оскільки навіть незначні зміни площ можуть призводити до юридичних суперечностей, необхідності переоформлення технічної документації та виникнення проблем під час реєстрації прав власності на земельні ділянки.

Проведене дослідження також підтвердило, що під час переходу до сучасних геоцентричних систем координат необхідно забезпечувати комплексний підхід до оцінки точності та узгодженості геодезичних даних. Недостатнє врахування впливу картографічних проекцій, параметрів трансформації та локальних деформацій координатної основи може призводити до накопичення систематичних похибок у кадастровій інформації та зниження достовірності результатів геодезичних робіт.

Таким чином, у процесі переходу від системи координат СК-63 до УСК-2000 основним фактором зміни площ земельних ділянок є саме проекційні спотворення, пов'язані з властивостями проекції Гаусса–Крюгера. Врахування даного фактору є необхідною умовою забезпечення високої точності кадастрових робіт, узгодженості просторових даних та коректного функціонування сучасних геоінформаційних і земельно-кадастрових систем.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ GNSS-МЕТОДОМ У РЕЖИМІ RTK

2.1. Загальна характеристика GNSS-технологій у режимі RTK

Сучасний розвиток супутникових геодезичних технологій забезпечує можливість оперативного та високоточного визначення координат точок місцевості у режимі реального часу. Одним із найбільш поширених методів високоточного позиціонування є RTK (Real Time Kinematic), який базується на використанні двочастотних GNSS-приймачів та мережі базових або перманентних станцій.

Технологія RTK дозволяє отримувати координати пунктів з сантиметровою точністю безпосередньо під час польових вимірювань, що значно підвищує продуктивність геодезичних робіт. Завдяки цьому метод широко застосовується у землеустрої, топографічному зніманні, будівництві, моніторингу деформацій споруд, кадастрових роботах та інженерній геодезії.

Основним принципом RTK-вимірювань є передавання диференційних поправок від базової станції до рухомого приймача (ровера) через мобільний інтернет або радіоканал. Для забезпечення високої точності використовуються фазові вимірювання несучих частот супутникових сигналів GPS, GLONASS, Galileo та BeiDou.

2.2. Особливості визначення координат у режимі реального часу

Визначення координат у режимі RTK ґрунтується на одночасному прийманні супутникових сигналів базовою станцією та рухомим приймачем. Базова станція, координати якої відомі з високою точністю, обчислює поправки до супутникових спостережень і передає їх роверу. Отримані поправки дозволяють мінімізувати вплив основних джерел похибок:

- іоносферних та тропосферних затримок;
- похибок супутникових орбіт;

- часових похибок супутникових годинників;
- впливу багатопроменевості сигналу;
- інструментальних похибок GNSS-приймачів.

Точність визначення координат значною мірою залежить від таких факторів:

- кількості доступних супутників;
- геометрії супутникового сузір'я;
- відстані до базової станції;
- якості GNSS-обладнання;
- умов приймання супутникового сигналу.

Для підвищення точності позиціонування сьогодні широко використовуються мережі активних перманентних станцій, які забезпечують користувачів диференційними поправками у режимі реального часу.

2.3. Аналіз мереж активних перманентних станцій

Розвиток мереж активних перманентних станцій став важливим етапом удосконалення супутникових геодезичних технологій. Однією з перших європейських мереж стала німецька система SAPOS, на основі якої були розроблені методи формування та інтерполювання диференційних поправок.

У Польщі успішно функціонує мережа ASG-EUPOS, яка забезпечує користувачів високоточними координатними визначеннями на всій території держави.

В Україні функціонують декілька мереж активних перманентних станцій:

- ZAKPOS — мережа, створена на базі технологій Trimble, що забезпечує роботу у режимі VRS та покриває західні області України;
- СКНОУ — система супутникового координатного забезпечення на основі технологій NovAtel, яка охоплює територію України;
- NGCNET — регіональна мережа Leica Geosystems, що функціонує переважно у Харківській області.

Використання таких мереж дозволяє значно скоротити час польових робіт, підвищити точність координатних визначень та забезпечити прив'язку результатів до державних геодезичних систем координат.

2.4. Методика дослідження точності GNSS-вимірювань у режимі RTK

Дослідження точності GNSS-вимірювань у режимі RTK виконуються шляхом порівняння результатів супутникових визначень із даними, отриманими традиційними геодезичними методами.

У процесі досліджень визначаються:

- просторові координати пунктів;
- нормальні та геодезичні висоти;
- перевищення між пунктами;
- довжини ліній між опорними точками.

Отримані результати порівнюються з даними:

- статичних GNSS-спостережень;
- геометричного нівелювання;
- лінійних вимірювань електронними тахеометрами або штриховими мірними приладами.

Для оцінки точності використовуються середньоквадратичні похибки, абсолютні та відносні відхилення, а також статистичний аналіз результатів вимірювань.

2.5. Оцінка точності координатних визначень

Під час виконання RTK-вимірювань основну увагу приділяють оцінці точності планових координат та висотного положення пунктів. Практика показує, що у сприятливих умовах точність планових координат становить 1–2 см, а висот - 2–5 см.

Найбільший вплив на точність мають:

- віддаленість від базової станції;

- нестабільність мобільного зв'язку;
- наявність перешкод для проходження супутникового сигналу;
- атмосферні умови;
- електромагнітні завади.

Порівняння результатів RTK-вимірювань із даними статичних спостережень та геометричного нівелювання підтверджує ефективність застосування GNSS-технологій для виконання інженерно-геодезичних робіт.

2.6 Характеристика об'єкта досліджень та методика виконання GNSS-спостережень

Дослідження точності визначення координат GNSS-методом у режимі RTK проводили на Бережанському навчально-науковому геодезичному полігоні, який є одним із добре досліджених геодезичних об'єктів України. Планово-висотне обґрунтування полігону формувалося та уточнювалося класичними геодезичними методами починаючи з 1968 року, а супутникові спостереження на його пунктах виконуються з 1999 року. Завдяки цьому полігон має надійне координатне та висотне забезпечення, що дозволяє використовувати його для оцінки точності сучасних GNSS-технологій.

У межах GNSS-кампанії 2011 року було виконано RTK-спостереження на 40 пунктах геодезичної мережі полігону. Додатково на чотирьох пунктах, для яких існували сумніви щодо стабільності їх положення, проведено статичні супутникові спостереження тривалістю дві години.

RTK-вимірювання здійснювали на пунктах, просторові координати яких були попередньо визначені статичним методом із використанням двочастотних GNSS-приймачів у 2007 та 2008 роках. Координати пунктів отримано у системі координат ETRS89. Середня квадратична похибка планового положення становила:

$$m_{BL}=0.026 \text{ м}$$

а середня квадратична похибка визначення висот:

$$m_H=0.018 \text{ м}$$

Опрацювання статичних GNSS-спостережень виконували із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення, у якому враховувалися точні ефемериди супутників та поправки за коливання фазових центрів антен. Прив'язку результатів здійснювали до мережі ETRS89 із використанням перманентної GNSS-станції SULP.

За результатами внутрішньої оцінки точності середня квадратична похибка прив'язки становила:

$$M_{BL}=0.015 \text{ м}$$

для планових координат та

$$m_H=0.025 \text{ м}$$

для висотного положення пунктів.

Нормальні висоти пунктів геодезичної мережі були визначені методом геометричного нівелювання III класу, тоді як перевищення між окремими пунктами отримано за результатами геометричного нівелювання II класу, що забезпечило високу точність висотної основи полігону.



Технічні характеристики SOUTH S82T

RTK режим, реальний час:

план — $\pm 10 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$

висота — $\pm 20 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$

Статичний режим з пост-опрацюванням:

план — $\pm 3 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$

висота — $\pm 5 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$

Рис. 1. Загальний вигляд приймача GNSS S82T виробництва SOUTH (Китай)

Для виконання досліджень використовували двочастотний GNSS RTK-приймач SOUTH S82T китайського виробництва компанії SOUTH Surveying & Mapping Technology. Даний приймач належить до сучасних високоточних геодезичних приладів, призначених для оперативного визначення координат у режимі реального часу. Обладнання забезпечує роботу як від окремої базової станції, так і в мережах активних перманентних станцій із підтримкою технології VRS (Virtual Reference Station), що дозволяє підвищити точність та стабільність координатних визначень.

Приймач підтримує роботу з декількома глобальними навігаційними супутниковими системами, зокрема GPS, GLONASS, а також іншими сучасними супутниковими сервісами позиціонування. Використання багаточастотних сигналів забезпечує швидке визначення фазової неоднозначності та отримання фіксованого розв'язку навіть у складних умовах спостережень.

Під час польових робіт спостереження виконували у режимі RTK із передаванням диференційних поправок через мобільний інтернет. Основною умовою запису координат точки у пам'ять приймача було отримання фіксованого (Fixed) розв'язку, який свідчить про успішне розв'язання фазових неоднозначностей і забезпечує сантиметрову точність координатних визначень. У випадках отримання плаваючого (Float) розв'язку результати вимірювань не фіксувалися, оскільки вони характеризуються нижчою точністю та меншою надійністю.

Для кожного пункту геодезичної мережі виконували контроль стабільності приймання супутникових сигналів, кількості видимих супутників, значення геометричного фактора DOP та якості прийнятих поправок від базових станцій. Особлива увага приділялася вибору умов спостережень: уникали зон із можливими перешкодами для проходження супутникового сигналу, таких як високі дерева, будівлі, металеві конструкції та джерела електромагнітних завад.

Застосування GNSS RTK-приймача дало можливість оперативно отримувати просторові координати пунктів без необхідності тривалого опрацювання результатів у камеральних умовах. Це суттєво скоротило тривалість польових робіт та підвищило ефективність виконання геодезичних вимірювань.

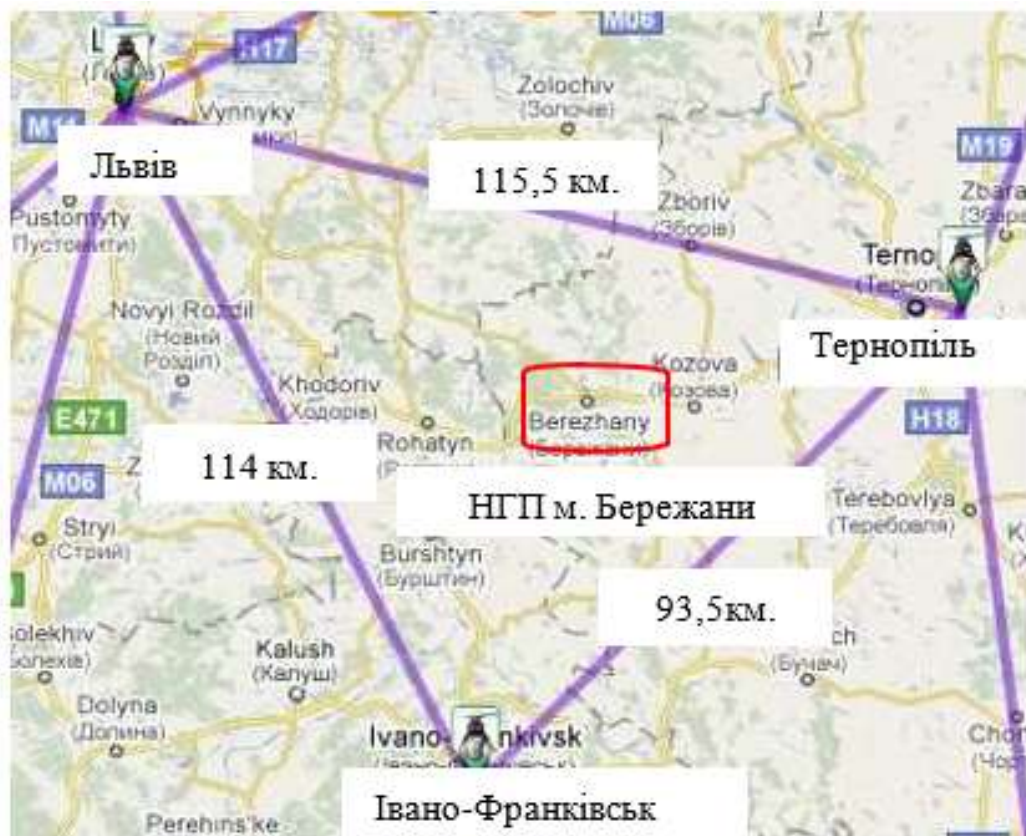


Рис.2. Район робіт, та фрагмент мережі ZAKPOS

Польові GNSS-спостереження виконували з використанням мережі активних перманентних станцій ZAKPOS, яка функціонує на території західної частини України. Центр обробки та керування мережею розташований у місті Mukachevo. Мережа створена на основі сучасних супутникових технологій та забезпечує користувачів диференційними поправками у режимі реального часу.

Станції мережі мають стабільно закріплені геодезичні пункти та працюють у системі координат ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989), що забезпечує однорідність і високу точність координатних визначень. Використання мережі ZAKPOS дозволяє виконувати RTK-вимірювання із планово-висотною точністю близько 1 см, що відповідає сучасним вимогам до виконання інженерно-геодезичних та кадастрових робіт.

Під час виконання польових спостережень особливу увагу приділяли точному визначенню висоти антени GNSS-приймача над центром геодезичного пункту. Для підвищення точності цей параметр визначали

методом геометричного нівелювання. Спочатку нівелірну рейку встановлювали безпосередньо на центр геодезичного знака, після чого виконували відлік. Далі після встановлення штатива та закріплення приймача рейку встановлювали на верхню частину підставки антени та повторювали вимірювання.

Різниця між отриманими відліками дозволяла визначити фактичну висоту встановлення антени над центром пункту. До цього значення додатково враховували висоту фазового центра антени над опорною підставкою. Саме висота до фазового центра антени є основним параметром, який вводиться до польового контролера під час RTK-вимірювань, оскільки від її точності безпосередньо залежить правильність визначення просторових координат та висот пунктів.

Після завершення польових робіт отримані геодезичні координати було трансформовано у плоску прямокутну систему координат триградусної зони із застосуванням проекції Гаусса–Крюгера. Перетворення координат виконували за допомогою семипараметричного перетворення Гельмерта, що забезпечує узгодження між глобальною супутниковою системою координат та локальною державною системою.

Для переходу від геодезичних висот до нормальних висот використовували модель українського квазігеоїда. Це дозволило забезпечити сумісність супутникових визначень із результатами класичних висотних вимірювань, отриманих методами геометричного нівелювання.

З метою оцінки стабільності положення геодезичних пунктів та точності супутникових визначень було виконано порівняння координат, отриманих статичним методом у 2011 році, з результатами спостережень 2007–2008 років. Такий аналіз дозволив оцінити можливі зміщення пунктів, а також визначити рівень збіжності між результатами різних циклів GNSS-спостережень.

Таблиця 1

**Порівняння координат, визначених статичним методом,
виконаних у 2011 р., із 2007–2008 рр. (система координат СК-63)**

Назва пункту	Абсциса x			Ордината y			Геодезична висота Н		
	x, м	x', м	$\delta = x - x'$	y, м	y', м	$\delta = y - y'$	H, м	H', м	$\delta = H - H'$
В-13	9,016	9,073	-0,057	9,984	9,956	+0,028	4,555	4,525	+0,030
В-14	6,514	6,531	-0,017	2,365	2,358	+0,007	1,697	1,661	+0,036
АС-1	2,215	2,228	-0,013	2,140	2,130	+0,010	4,398	4,373	+0,025
В-15	9,055	8,936	+0,119	3,874	3,849	+0,025	7,705	7,655	+0,050
<u>С.к.п.</u>			0,067			0,020			0,036
<u>С.к.п.</u> без В-13 та В-15			0,015			0,009			0,031

У таблиці 1 наведено результати порівняння координат пунктів геодезичної мережі, отриманих за результатами статичних GNSS-спостережень різних років. Позначення x, y, Н відповідають координатам та висотам пунктів, визначеним під час спостережень 2011 року, тоді як x', y', Н' характеризують координати, отримані в ході супутникових вимірювань 2007–2008 років.

Порівняльний аналіз даних таблиці показав, що для більшості пунктів геодезичної мережі розбіжності координат мають незначний характер і знаходяться в межах допустимих похибок супутникових визначень. Це свідчить про достатню стабільність пунктів полігону та високу точність виконаних статичних GNSS-спостережень.

Разом із тим для пунктів В-13 та В-15 виявлено помітні відхилення координат у порівнянні з результатами попередніх циклів спостережень. Імовірною причиною таких розбіжностей є похибки трансформування координат під час переходу від глобальної геоцентричної системи координат ETRS89 до системи координат 1963 року. Відомо, що використання застарілих параметрів трансформації або локальних моделей переходу може призводити до виникнення систематичних зміщень координат, особливо у випадках нерівномірного розподілу вихідних пунктів геодезичної мережі.

Додатковим фактором появи розбіжностей можуть бути деформаційні процеси геодезичних знаків, накопичення похибок попередніх вимірювань, а також відмінності у програмному забезпеченні та математичних моделях обробки GNSS-даних.

Для перевірки достовірності отриманих результатів було виконано додаткове порівняння координат, визначених статичним методом у 2011 році, з аналогічними результатами спостережень 2007–2008 років безпосередньо у просторовій прямокутній системі координат ETRS89. Такий підхід дозволяє виключити вплив похибок трансформування координат між різними системами та забезпечує більш об'єктивну оцінку точності супутникових визначень.

Порівняння координат у системі ETRS89 підтвердило високу узгодженість результатів для більшості пунктів геодезичної мережі. Це свідчить про надійність виконаних GNSS-спостережень, стабільність положення пунктів полігону та ефективність застосування статичного методу для високоточного визначення координат.

Таблиця 2

**Порівняння координат, визначених статичним методом,
виконаних у 2011 р., із 2007–2008 рр. (система координат ETRS-89)**

Назва пункту	Координата X			Координата Y			Координата Z		
	X, м	X', м	$\delta = X - X'$	Y, м	Y', м	$\delta = Y - Y'$	Z, м	Z', м	$\delta = Z - Z'$
В-13	1,928	1,891	+0,037	9,649	9,614	+0,035	3,303	3,304	-0,001
В-14	7,876	7,852	+0,024	8,163	8,157	+0,006	4,758	4,732	+0,026
АС-1	9,023	9,007	+0,016	0,233	0,227	+0,006	1,475	1,456	+0,019
В-15	7,064	7,044	+0,020	6,309	6,271	+0,038	9,569	9,532	+0,037
С.к.п.			0,025			0,026			0,025

Як показують результати, наведені у таблиці 2, отримані координати характеризуються високою збіжністю між різними циклами спостережень, а виявлені розбіжності не перевищують допустимих меж похибок для GNSS-визначень такого класу точності. Це підтверджує стабільність положення більшості геодезичних пунктів та надійність результатів статичних супутникових спостережень.

Аналіз результатів також свідчить про ефективність використання системи координат ETRS89 для виконання високоточних GNSS-вимірювань, оскільки саме у цій системі забезпечується найкраща узгодженість координат, отриманих у різні роки спостережень.

З метою детальнішого дослідження точності визначення координат у режимі реального часу було виконано додаткові GNSS-спостереження у

режимі RTK. Вимірювання проводили на пунктах геодезичної мережі, координати яких були попередньо визначені статичним методом під час спостережень 2007–2008 років і приймалися як еталонні.

Для підвищення достовірності результатів RTK-вимірювання на кожному пункті виконували п'ятьма окремими сесіями спостережень. Такий підхід дозволив оцінити повторюваність результатів, стабільність отриманих координат та вплив можливих випадкових похибок на точність позиціонування.

Під час кожної сесії фіксували планові координати, висотне положення пунктів, кількість доступних супутників, тип отриманого розв'язку та показники якості супутникового сигналу. Особливу увагу приділяли отриманню фіксованого (Fixed) розв'язку, що забезпечує сантиметрову точність координатних визначень у режимі RTK.

Результати опрацювання виконаних RTK-спостережень та їх порівняння з координатами, отриманими статичним методом, наведено у таблиці 3. Проведений аналіз дозволяє оцінити рівень точності RTK-технології та визначити можливість її застосування для виконання високоточних інженерно-геодезичних і кадастрових робіт.

Таблиця 3

**Порівняння координат, визначених у RTK режимі, із статичним
2007–2008 рр. (система координат ETRS-89)**

Назва пункту	Координата X			Координата Y			Координата Z		
	X, м	X', м	$\delta = X - X'$	Y, м	Y', м	$\delta = Y - Y'$	Z, м	Z', м	$\delta = Z - Z'$
LAPS	3,015	2,997	+0,018	9,975	9,980	-0,005	7,055	7,013	+0,042
B-15	7,034	7,044	-0,010	6,290	6,271	+0,019	9,567	9,532	+0,035
AC-1	9,014	9,007	+0,007	0,223	0,227	-0,004	1,468	1,456	+0,012
B-13	1,889	1,891	-0,002	9,639	9,614	+0,025	3,279	3,304	-0,025
BAZA	7,442	7,448	-0,006	9,675	9,745	-0,070	7,865	7,868	-0,003
B-14	7,850	7,852	-0,002	8,132	8,157	-0,025	4,736	4,732	+0,004
Drb	9,227	9,241	-0,014	6,592	6,604	-0,012	9,353	9,338	+0,015
pp XIX	9,114	9,102	+0,012	8,176	8,173	+0,003	5,778	5,755	+0,023
pp 055	5,343	5,314	+0,029	0,647	0,635	+0,012	0,582	0,525	+0,057
pp 102	7,973	7,931	+0,042	4,026	3,975	+0,051	0,716	0,670	+0,046
pp 101	0,214	0,214	+0,000	5,821	5,825	-0,004	6,313	6,301	+0,012
AP-4	8,730	8,723	+0,007	1,361	1,369	-0,008	9,077	9,048	+0,029
С.к.п.			0,017			0,028			0,030

У табл. 3: X, Y, Z – координати пунктів, одержані у RTK режимі під час спостережень у 2011 р.; X', Y', Z' – координати пунктів, одержані статичним методом 2007–2008 рр.

Із результатів, поданих у табл. 3, бачимо, що найменша точність визначення координат – по осі Z.

Для дослідження точності визначення планового положення пунктів у RTK режимі – залежно від кількості сесій – спостереження виконано різною кількістю сесій. Оцінку точності визначення координат пунктів залежно від кількості сесій спостережень у RTK режимі із статичним подано в табл. 4.

У табл. 4: $m = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2}$ мм – середня квадратична похибка положення пункту, яку обчислював прилад: $M = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2}$ мм – середня квадратична похибка положення пункту, обчислена за різницями середнього значення вказаної кількості сесій RTK і статичними даними координат пунктів полігона.

Таблиця 4

**Порівняння точності визначення координат пунктів
залежно від кількості сесій спостережень у RTK режимі із статичним**

Назва пункту	Кількість сесій спостережень у RTK режимі													
	25		10		5		4		3		2		1	
	m	M	m	M	m	M	m	M	m	M	m	M	m	M
	Середні квадратичні похибки обчислено у міліметрах													
LAPS	13	17	13	17	13	19	13	19	13	19	13	21	13	21
B-15	15	19	15	20	15	21	15	16	15	11	15	10	15	15
AC-1	-	-	-	-	24	08	25	06	25	08	28	11	26	14
B-13	-	-	-	-	15	25	15	26	15	28	15	29	16	32
BAZA	-	-	-	-	12	70	12	70	12	68	12	66	12	64
B-14	-	-	-	-	13	25	13	26	13	27	13	28	13	21
Drb	-	-	-	-	10	18	10	19	10	17	10	16	10	10
pp XIX	-	-	-	-	09	12	09	10	09	13	09	13	09	15
pp 055	-	-	-	-	12	31	12	30	12	31	12	28	12	33
pp 102	-	-	-	-	13	66	13	66	13	66	13	64	12	61
pp 101	-	-	-	-	09	04	09	05	09	07	09	06	09	12
AP-4	-	-	-	-	10	11	10	11	09	10	09	08	09	07

Аналіз результатів, наведених у таблиці 4, показує, що збільшення кількості RTK-сесій понад дві не забезпечує суттєвого підвищення точності координатних визначень. Це свідчить про те, що основний ефект усереднення випадкових похибок досягається вже після виконання перших двох незалежних серій спостережень, а подальше накопичення вимірювань практично не впливає на покращення кінцевого результату.

За результатами трьох сесій середнє значення середньоквадратичної похибки планового положення пункту, яке автоматично визначалося приймачем, становило:

$$M_{\text{сер}} = 14 \text{ мм}$$

Водночас фактична середньоквадратична похибка, отримана шляхом порівняння із координатами, визначеними статичним методом, дорівнювала:

$$M_{\text{сер}}=33 \text{ мм}$$

Отже, внутрішня оцінка точності, яку надає GNSS-приймач у режимі RTK, виявилася приблизно у два рази оптимістичнішою за реальні значення похибок. Це пояснюється тим, що програмне забезпечення приймача враховує переважно внутрішню збіжність супутникових спостережень, але не повністю компенсує вплив зовнішніх факторів, таких як багатопроменевість сигналу, атмосферні збурення, нестабільність поправок або локальні перешкоди.

На основі результатів, поданих у таблиці 4, можна зробити висновок, що середньоквадратична похибка визначення положення пунктів методом RTK при виконанні п'яти незалежних сесій спостережень відносно статичних GNSS-визначень не перевищує 70 мм, а її середнє значення становить приблизно 26 мм. Отримані результати підтверджують можливість використання RTK-технології для виконання більшості інженерно-геодезичних та кадастрових робіт, де допускається сантиметровий рівень точності.

Для окремих пунктів були зафіксовані більші розбіжності координат. Зокрема, на пункті 102 лінійна похибка досягала 66 мм. Імовірною причиною такого відхилення є несприятливі умови виконання спостережень: пункт розташований поблизу орних земель, що могло спричинити нестабільність центрування або локальні деформації поверхні. Крім того, вимірювання проводилися під лініями електропередач у дощову погоду, що могло негативно вплинути на якість приймання супутникових сигналів через електромагнітні завади та підвищену вологість атмосфери.

На пункті BAZA максимальна похибка становила близько 70 мм. Основною причиною цього, ймовірно, була наявність зовнішнього металевого знака у вигляді залізної піраміди, яка створювала додаткові умови для виникнення багатопроменевості супутникових сигналів та локальних перешкод під час приймання GNSS-сигналів.

Для оцінки точності визначення довжин ліній без урахування впливу трансформації координат було виконано окреме дослідження точності визначення віддалей у режимі RTK. Вимірювання проводили на пунктах фазової ділянки взірцевого базиса геодезичного полігону. Спостереження виконували у прямому та зворотному ходах за схемою послідовного проходження пунктів базиса.

Еталонними значеннями приймалися лінійні інтервали базиса, визначені у 2010 році інварними рулетками та контрольним метром із точністю близько: 0.5 мм

Відстані між пунктами 13–14 та 14–15, які також використовували як еталонні, були визначені за результатами двогодинних статичних GNSS-спостережень із використанням двочастотного приймача. Довжини ліній обчислювали за просторовими координатами пунктів.

У таблиці 5 наведено результати порівняння довжин інтервалів базиса, отриманих у RTK-режимі п'ятьма незалежними сесіями у прямому та зворотному ходах, із еталонними значеннями. У таблиці:

- D0D_0D0 — еталонні віддалі, визначені інварними рулетками, контрольним метром або статичними GNSS-вимірюваннями;
- DRTK1D_{RTK1}DRTK1 — віддалі, отримані у RTK-режимі під час прямого ходу;
- DRTK2D_{RTK2}DRTK2 — віддалі, отримані у RTK-режимі під час зворотного ходу.

Аналіз результатів, наведених у таблиці 5, показав, що точність визначення окремих віддалей у режимі RTK досягає приблизно 20 мм, тоді як середня похибка становить близько 9 мм. Це свідчить про достатньо високу точність RTK-визначень для виконання оперативних геодезичних робіт, пов'язаних із визначенням лінійних параметрів геодезичних мереж та інженерних об'єктів.

Таблиця 5

Порівняння віддалей, визначених у RTK режимі, із еталонними

№ з/п	Назва пункту	D ₀ , мм	D _{RTK1} , мм	$\delta D = D_{RTK1} - D_0$	D _{RTK2} , мм	$\delta D = D_{RTK2} - D_0$
1	B-1	1496,5	1490,1	-6,4	1514,1	+17,6
2	B-2	9984,5	9987,0	+2,5	9965,1	-19,4
3	B-3	971,3	980,1	+8,8	977,3	+6,0
4	B-4	997,2	987,2	-10,0	995,2	-2,0
5	B-5	1000,5	1002,7	+2,2	993,3	-7,2
6	B-6	1002,3	1008,1	+5,8	1019,5	+17,2
7	B-7	1002,0	1004,6	+2,6	996,0	-6,0
8	B-8	1002,0	1000,7	-1,3	1007,4	+5,4
9	B-9	997,0	994,2	-2,8	1001,9	+4,9
10	B-10	997,7	1000,4	+2,7	1001,6	+3,9
11	B-11	1002,3	999,3	-3,0	1002,3	0,0
12	B-12	940,0	944,8	+4,8	924,0	-16,0
13	B-13	583783,8	583790,8	+7,0	583801,9	+18,1
14	B-14	2604459,6	2604458,9	-0,7	2604458,9	-0,7
15	B-15	С.к.п.		5,1		11,2

Таблиця 6

Порівняння нормальних висот та перевишень, одержаних у RTK режимі, із результатами геометричного нівелювання (Балтійська система-77)

Назва пункту	$H_B, \text{ м}$	$H_R, \text{ м}$	$H_{\text{геом}}, \text{ м}$	$\delta_H = H_R - H_B$ мм	$b_{\text{с}}, \text{ м}$	$b_{\text{в}}, \text{ м}$	$b_{\text{с}}, \text{ м}$	$\delta_b = b_{\text{с}} - b_{\text{в}}$ мм	$\delta_b = b_{\text{с}} - b_{\text{в}}$ мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B-1	336,723	304,516	304,534	-18	-0,045	-0,045	-0,052	+07	+07
B-2	336,678	304,471	304,482	-11	+0,065	0,065	0,069	-04	-04
B-3	336,743	304,536	304,551	-15	-0,012	-0,012	0,002	-14	-14
B-4	336,731	304,524	304,553	-29	+0,018	0,018	0,004	+14	+14
B-5	336,749	304,542	304,557	-15	-0,016	-0,016	-0,001	-15	-15
B-6	336,733	304,526	304,556	-30	+0,005	0,005	-0,005	+10	+10
B-7	336,738	304,531	304,551	-20	+0,021	0,021	0	+21	+21
B-8	336,759	304,552	304,551	+1	-0,012	-0,012	0,006	-18	-18
B-9	336,747	304,540	304,557	-17	+0,002	0,002	-0,001	+03	+03
B-10	336,749	304,542	304,556	-14	+0,007	+0,007	-0,001	+08	+08
B-11	336,756	304,549	304,555	-6	-0,012	-0,012	0	-12	-12
B-12	336,744	304,537	304,555	-18	-0,004	-0,004	-0,002	-02	-02
B-13	336,740	304,533	304,553	-20	-2,882	-2,872	-2,850	-32	-22
B-14	333,858	301,661	301,703	-42	+2,735	+2,725	+2,714	+21	+11
AC-1	336,593	304,386	304,417	-31	-14,571	-4,569	-14,554	-17	-15
BAZA	322,022	289,817	289,863	-46	-16,360	-16,360	-16,367	+07	+07
pp8370	305,662	273,457	273,496	-39	+25,802	+25,801	+25,802	00	-01
pp3395	331,464	299,258	299,298	-40	-1,010	-1,013	-1,003	-07	-10
Rp4(F)	330,454	298,245	298,295	-50	32,526	32,524	32,506	+20	+18
Drb	362,980	330,769	330,801	-32	-18,988	-18,997	-18,999	+11	+02
XIX	343,992	311,772	311,802	-30	+39,307	+39,289	+39,281	+26	+08
pp 6511	383,299	351,061	351,083	-22	+1,474	+1,474	+1,393	+81	+81
AP-2*	384,773*	352,535	352,476	+59	-15,175	-15,166	-15,079	-96	-87
Mazu	369,598	337,369	337,397	-28	-7,660	-7,656	-7,660	00	+04
pp 53	361,938	329,713	329,737	-24	-4,981	-4,983	-5,022	+41	+39
pp 55	356,957	324,730	324,715	+15	+3,800	+3,781	+3,780	+20	+01
pp102	360,757	328,511	328,495	+16	-16,966	-16,997	-16,934	-32	-63
pp101	343,791	311,514	311,561	-47	+5,344	+5,403	+5,363	-19	+40
AP-4	349,135	316,917	316,924	-7	-24,892	-24,882	-24,874	-18	-08
pp5568	324,243	292,035	292,050	-15	+71,984	+72,033	+72,026	-42	+07
Lapsh	396,227	364,068	364,076	-8	-41,596	-41,644	-41,638	+51	+03
pp 23	354,631	322,424	322,429	-5					
Сер. квадр. похибка				28	Сер. квадр. похибка			30	28

Для оцінювання точності визначення нормальних висот GNSS-методом у режимі RTK було виконано серію супутникових спостережень на 33 пунктах геодезичного полігону. Для кожного пункту вимірювання проводили п'ятьма незалежними сесіями, що дало можливість оцінити повторюваність

результатів та визначити вплив випадкових похибок на точність висотних визначень.

Еталонними значеннями приймалися нормальні висоти пунктів, отримані раніше методом геометричного нівелювання високої точності. Порівняння нормальних висот, визначених у RTK-режимі (HR), з висотами, отриманими за результатами геометричного нівелювання (HГ), наведено у таблиці 6.

Окрім безпосереднього порівняння абсолютних висот, було виконано аналіз перевищень між сусідніми пунктами полігону. Для цього обчислювали:

- геодезичні перевищення (h_E), визначені за геодезичними висотами GNSS-вимірювань;
- нормальні перевищення (h_R), отримані за нормальними висотами RTK-визначень;
- перевищення (h_Γ), одержані методом геометричного нівелювання.

Подальше порівняння кожного типу перевищень із результатами геометричного нівелювання дозволило оцінити точність висотних визначень та стабільність RTK-вимірювань у вертикальній площині.

Аналіз результатів, наведених у таблиці 6, показав, що середньоквадратична похибка визначення нормальних висот GNSS-методом у режимі RTK становить:

$$mH=28 \text{ мм}$$

Після виключення з обробки пункту АП-2, який розташований поблизу узлісся та характеризується несприятливими умовами приймання супутникових сигналів, значення середньоквадратичної похибки зменшується до:

$$mH=26 \text{ мм}$$

Це підтверджує суттєвий вплив навколишніх умов спостережень на точність висотних GNSS-визначень. Наявність дерев, перешкод та багатопроменевості сигналу може викликати додаткові систематичні та випадкові похибки під час визначення висот.

Дослідження перевищень між пунктами показало, що точність їх визначення практично не залежить від способу обчислення перевищень. Середньоквадратичні похибки становили:

- для геодезичних перевищень:

$m_h=30$ мм

- для нормальних перевищень:

$m_h=28$ мм

Після виключення результатів пункту АП-2 відповідні значення похибок зменшилися до 21 мм та 19 мм, що свідчить про високу чутливість RTK-вимірювань до умов супутникового сигналу та характеристик місцевості.

Отримані результати підтверджують, що RTK-технологія забезпечує достатню точність визначення нормальних висот і перевищень для більшості інженерно-геодезичних та кадастрових робіт. Проте для робіт, які потребують міліметрової точності висотних визначень, перевагу слід надавати геометричному нівелюванню.

ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ

У результаті проведеного аналізу встановлено, що GNSS-технології у режимі RTK забезпечують високу оперативність та достатню точність визначення координат для більшості геодезичних і кадастрових робіт. Використання мереж активних перманентних станцій дозволяє підвищити надійність координатних визначень та забезпечити їх відповідність державним системам координат.

Дослідження підтверджують, що режим RTK є ефективним інструментом сучасної геодезії та може успішно застосовуватись для виконання топографо-геодезичних робіт різного рівня складності.

За результатами проведених досліджень точності GNSS-визначень у режимі RTK можна зробити такі висновки:

- Аналіз координат, отриманих у системі координат 1963 року, показав наявність суттєвих розбіжностей між результатами статичних GNSS-спостережень 2011 року та вимірюваннями 2007–2008 років. Це свідчить про неоднозначність параметрів трансформації між системами координат та можливі похибки переходу до системи координат 1963 року.
- У системі ETRS89 результати координатних визначень характеризуються високою збіжністю, що підтверджує стабільність положення контрольних пунктів геодезичного полігону та надійність виконаних статичних спостережень.
- Для виявлення та усунення грубих помилок під час RTK-вимірювань доцільно виконувати щонайменше дві незалежні сесії спостережень на кожному пункті. Подальше збільшення кількості сесій не забезпечує суттєвого підвищення точності результатів.
- Точність визначення координат, яка відображається у програмному забезпеченні GNSS-приймача, досягається лише за умови отримання фіксованого (Fixed) розв'язку.

- Внутрішня оцінка точності, що визначається приймачем, є дещо оптимістичною порівняно з фактичними результатами. Середнє значення середньоквадратичної похибки планового положення, визначене приймачем, становило 14 мм, тоді як реальна похибка досягала близько 33 мм.
- Середня середньоквадратична похибка визначення довжин ліній у режимі RTK становить приблизно 8–9 мм, а максимальні відхилення не перевищують 19–20 мм, що підтверджує високу точність визначення віддалей супутниковими методами.
- Середня середньоквадратична похибка визначення нормальних висот у режимі RTK становить близько 28 мм, а максимальні відхилення можуть досягати 59 мм залежно від умов спостережень.
- Середньоквадратичні похибки визначення перевищень між пунктами становлять у середньому 30 мм для геодезичних перевищень та 28 мм для нормальних перевищень. Максимальні значення похибок можуть досягати 96 мм та 87 мм відповідно.
- Загалом результати досліджень підтверджують ефективність застосування GNSS RTK-технологій для виконання оперативних топографо-геодезичних, інженерних та кадастрових робіт, де необхідна сантиметрова точність координатних визначень у реальному часі.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА УЗГОДЖЕНОСТІ ДАНИХ ПРИ ПЕРЕХОДІ ДО ГЕОЦЕНТРИЧНОЇ СИСТЕМИ КООРДИНАТ

3.1. Загальні положення переходу між системами координат

Сучасний розвиток супутникових геодезичних технологій, геоінформаційних систем та цифрового землеустрою потребує використання єдиних геоцентричних систем координат, які забезпечують просторову сумісність геодезичних, картографічних та кадастрових даних. У більшості сучасних GNSS-вимірювань координати визначаються у глобальних геоцентричних системах координат, зокрема WGS-84 або ETRS89, тоді як значна частина раніше створених картографічних та кадастрових матеріалів України представлена у системах координат СК-42 та СК-63.

Перехід між локальними та геоцентричними системами координат є складним процесом, що супроводжується виникненням додаткових похибок трансформування. Основною причиною цього є відмінність параметрів референц-еліпсоїдів, способів орієнтування координатних осей, різниця у вихідних геодезичних даних та наявність локальних деформацій державних геодезичних мереж.

Особливо актуальною ця проблема є під час інтеграції архівних картографічних матеріалів, кадастрових планів та результатів попередніх геодезичних робіт із сучасними GNSS-вимірюваннями. Неточності координатного переходу можуть призводити до зміщення меж земельних ділянок, розбіжностей між цифровими картами та фактичним положенням об'єктів на місцевості, а також до помилок при створенні геоінформаційних баз даних.

У сучасній геодезичній практиці для координатного перетворення найчастіше використовують просторове семипараметричне перетворення Гельмерта, яке враховує:

- три параметри зміщення координатних осей;

- три параметри обертання систем координат;
- масштабний коефіцієнт.

Математична модель семипараметричного перетворення Гельмерта має вигляд:

$$\begin{cases} X_2 = X_1 + \Delta X + mX_1 - r_z Y_1 + r_y Z_1 \\ Y_2 = Y_1 + \Delta Y + r_z X_1 + mY_1 - r_x Z_1 \\ Z_2 = Z_1 + \Delta Z - r_y X_1 + r_x Y_1 + mZ_1 \end{cases}$$

де:

- X_1, Y_1, Z_1 — координати у вихідній системі;
- X_2, Y_2, Z_2 — координати у цільовій системі;
- $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ — параметри зміщення;
- r_x, r_y, r_z — кути повороту;
- m — масштабний параметр.

Застосування даного перетворення дозволяє забезпечити узгодження координат між різними системами координат, проте точність результатів значною мірою залежить від правильності визначення параметрів трансформації та якості вихідних геодезичних даних.

3.2. Особливості переходу між СК-42, СК-63 та геоцентричними системами координат

Системи координат СК-42 та СК-63 були створені на основі еліпсоїда Красовського та тривалий час використовувалися для виконання топографо-геодезичних і землеустроювальних робіт на території України. Проте ці системи мають локальний характер і не забезпечують достатньої сумісності із сучасними супутниковими технологіями.

Глобальна система координат WGS-84 є геоцентричною та використовується всіма сучасними супутниковими навігаційними системами. Перехід до цієї системи дозволяє забезпечити:

- єдине координатне середовище;

- інтеграцію GNSS-вимірювань;
- сумісність із цифровими картами та ГІС;
- підвищення точності геопросторових даних;
- можливість міжнародного обміну геоданими.

Однак при переході між СК-42, СК-63 та WGS-84 виникають певні труднощі. Основною проблемою є неоднозначність параметрів трансформації, які можуть відрізнятися залежно від:

- регіону виконання робіт;
- вихідних геодезичних пунктів;
- програмного забезпечення;
- математичної моделі трансформації;
- точності вихідних координат.

У різних програмних продуктах можуть застосовуватись відмінні параметри Гельмерта, що призводить до отримання різних координатних значень для одних і тих самих об'єктів. Особливо це проявляється під час роботи з архівними матеріалами, створеними у СК-63.

Дослідження показують, що величина координатних зміщень після трансформації може досягати декількох метрів, а в окремих випадках — десятків метрів. Такі похибки є критичними для виконання кадастрових та землеустроювальних робіт, де необхідна висока точність визначення меж земельних ділянок.

3.3. Аналіз точності координатного трансформування

Для дослідження точності координатного перетворення було виконано порівняння координат пунктів, визначених у системах СК-42, СК-63 та WGS-84. Перетворення координат виконували із застосуванням різних параметрів Гельмерта та декількох програмних продуктів.

Під час дослідження аналізувалися:

- планові зміщення координат;
- висотні розбіжності;

- середньоквадратичні похибки трансформації;
- стабільність параметрів перетворення;
- узгодженість результатів у різних програмних середовищах.

Результати досліджень показали, що найбільші похибки виникають саме під час переходу від локальних систем координат до геоцентричних. Основними причинами цього є:

- локальні деформації геодезичних мереж;
- накопичення похибок попередніх координатних визначень;
- неточність параметрів трансформації;
- відмінності математичних моделей;
- використання різних наборів контрольних пунктів.

Середня величина планових розбіжностей під час переходу між системами координат може становити:

$$M \times y = 0.05 - 0.30 \text{ м}$$

а в окремих випадках перевищувати:

$$m \times y > 1 \text{ м}$$

Для висотних визначень похибки можуть бути ще більшими через складність переходу між різними висотними системами та використання моделей геоїда.

Починаючи з радянського періоду, на території України сформувався значний фонд архівних картографічних матеріалів, які й сьогодні активно використовуються у сфері геодезії, землеустрою та земельних відносин. Значна частина таких матеріалів створювалася у системах координат СК-42 та СК-63, унаслідок чого великий обсяг землевпорядної та кадастрової документації досі зберігається саме у цих координатних системах.

Система координат СК-42 та створена на її основі система СК-63 тривалий час були базовими для виконання топографо-геодезичних і землеустроювальних робіт на території колишньої УРСР. Саме вони стали основою для формування більшості місцевих систем координат, які використовувалися у різних регіонах України. Зокрема, до впровадження

державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000 розграфлення та номенклатура топографічних і кадастрових планів орієнтувалися переважно на місцеві системи координат, створені на базі СК-42. У деяких містах України, наприклад у Харкові, окремі місцеві системи координат, похідні від СК-42, частково використовуються і сьогодні.

Із впровадженням державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000 розпочався процес переходу до сучасного геоцентричного координатного забезпечення. Однак на практиці значна частина землевпорядних робіт продовжує виконуватися у системі координат СК-63. Така ситуація частково суперечить нормативним вимогам щодо впровадження УСК-2000, визначеним постановами Кабінету Міністрів України та чинними нормативно-правовими документами у сфері землеустрою і геодезії.

Основною причиною збереження використання застарілих систем координат є складність забезпечення точного математичного переходу між радянськими локальними системами координат та сучасними високоточними геоцентричними системами. Низька точність вихідних геодезичних мереж, локальні деформації координатного простору, різні параметри еліпсоїдів та неоднозначність трансформаційних параметрів ускладнюють процес координатного перетворення.

Для ефективного використання різних систем координат у геодезичних, кадастрових та землевпорядних роботах між ними повинна існувати надійна інтеграція, що реалізується за допомогою математично обґрунтованих параметрів переходу. Наявність такого координатного зв'язку дозволяє виконувати трансформацію координат із мінімальними похибками та забезпечує сумісність геопросторових даних у різних інформаційних системах.

Коректне координатне перетворення має особливо важливе значення під час визначення площ земельних ділянок, довжин меж, координат поворотних точок та інших геометричних характеристик кадастрових об'єктів. Саме

точність координатного переходу безпосередньо впливає на достовірність результатів землеустрою, створення цифрових кадастрових планів та функціонування сучасних геоінформаційних систем.

У сучасній землевпорядній та геодезичній практиці перехід до державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000 здійснюється двома основними способами.

Перший спосіб передбачає перетворення наявних архівних матеріалів, координати яких визначені у застарілих системах координат СК-42 або СК-63. Такий підхід широко застосовується під час оновлення кадастрової документації, оцифрування топографічних планів, перенесення меж земельних ділянок у сучасні геоінформаційні системи та інтеграції раніше створених картографічних матеріалів із сучасними цифровими базами даних.

Другий спосіб базується на використанні глобальних навігаційних супутникових систем GNSS, які забезпечують визначення координат безпосередньо у глобальних геоцентричних системах координат, зокрема WGS-84 або ETRS89. Надалі отримані координати трансформуються до системи УСК-2000 з використанням відповідних параметрів переходу та моделей координатного перетворення.

Попередні дослідження показали, що параметри переходу між різними системами координат можуть формуватись двома основними шляхами: або шляхом математично обґрунтованого емпіричного зв'язку між системами координат, або внаслідок використання спеціальних трансформаційних полів. Саме це пояснює відмінність між поняттями «координатне перетворення» та «координатне трансформування».

Координатне перетворення зазвичай ґрунтується на строгих математичних залежностях між системами координат та використанні фіксованих параметрів переходу. Натомість трансформування координат враховує локальні деформації координатного простору, похибки державних геодезичних мереж, неоднорідність вихідних даних та інші регіональні

особливості, що виникли внаслідок тривалого використання локальних систем координат.

У межах даного дослідження основну увагу приділено саме процесу трансформування координат, оскільки він є найбільш актуальним для сучасних землепорядних і кадастрових робіт. Особливий інтерес становить аналіз математичних моделей трансформації, оцінка точності отриманих результатів та дослідження впливу конфігурації опорних пунктів на якість координатного переходу.

Під час дослідження розглядаються такі аспекти:

- аналіз математичних методів трансформації координат;
- дослідження семипараметричного перетворення Гельмерта;
- оцінка впливу кількості та рівномірності розташування опорних точок;
- визначення залишкових похибок трансформації;
- дослідження стабільності параметрів переходу;
- аналіз точності координатних перетворень у різних програмних комплексах.

Особливе значення має правильний вибір опорних пунктів, які використовуються для визначення параметрів трансформації. Нерівномірне розташування таких пунктів або використання нестабільних геодезичних знаків може призводити до значних локальних деформацій та збільшення похибок координатного переходу.

Крім того, важливим фактором є застосування сучасних програмних засобів геодезичної обробки даних, які дозволяють автоматизувати процес трансформування координат, виконувати контроль точності та аналізувати залишкові нев'язки між системами координат.

Отримані результати досліджень можуть бути використані для вдосконалення технології переходу між системами координат СК-42, СК-63 та УСК-2000, а також для підвищення точності геодезичних і землепорядних робіт в умовах широкого впровадження цифрових геоінформаційних технологій.

I спосіб **II спосіб**

$\omega'_x, \omega'_y, \omega'_z, \Delta m', D'_x, D'_y, D'_z$ $\omega_x, \omega_y, \omega_z, \Delta m, D_x, D_y, D_z$

CK-42 X', Y', Z' YСК-2000 X, Y, Z WGS-84 (ITRF2000) $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$

a, e^2 a, e^2 $\bar{a}, e^2$

$\omega'_x, \omega'_y, \omega'_z, \Delta m', D'_x, D'_y, D'_z$ $\omega_x, \omega_y, \omega_z, \Delta m, D_x, D_y, D_z$

CK-42 B', L', H'^T YСК-2000 B, L, H^T WGS-84 (ITRF2000) $\bar{B}, \bar{L}, \bar{H}^T$

L_0, a, e^2 L_0, a, e^2 L_0, a, e^2

$\Delta a, \Delta e^2$ $\Delta a, \Delta e^2$

CK-63 (3^о зони) x', y' YСК-2000 x, y WGS-84 (ITRF2000) $\dot{x}, \dot{y}$

CK-42 (6^о зони) x', y'

— напрям трансформування (математичні методи)
 — напрям перетворення (строгий ключ)

$\omega'_x, \omega'_y, \omega'_z, \Delta m', D'_x, D'_y, D'_z$ — параметри Гельмерта; $a, e^2, \bar{a}, e^2$ — параметри еліпсоїдів;
 L_0 — осьовий меридіан
 X, Y, Z — просторові прямокутні координати; B, L, H^T — просторові геодезичні координати;
 x, y — плоскі прямокутні координати

виконувати координатне трансформування навіть у випадках, коли відсутні офіційно затверджені параметри переходу між системами координат.

Точність отриманих результатів у разі використання локальних ключів значною мірою залежить від ряду факторів, серед яких основними є:

- обрана математична модель трансформації;
- кількість та рівномірність розташування опорних пунктів;
- конфігурація трансформаційної мережі;
- точність вихідних координат;
- наявність локальних деформацій геодезичної основи;
- якість вихідних картографічних матеріалів.

Особливо важливим є правильне розташування опорних точок у межах території дослідження. Нерівномірний розподіл таких пунктів або їх недостатня кількість можуть призводити до збільшення локальних похибок та погіршення точності координатного переходу.

Другий спосіб базується на використанні параметрів Гельмерта, які забезпечують строгий математичний зв'язок між сучасними геоцентричними системами координат, зокрема ITRS/ITRF2000, WGS-84 та UСК-2000. Семипараметричне перетворення Гельмерта є одним із найбільш поширених методів координатного перетворення у світовій геодезичній практиці та широко використовується для інтеграції GNSS-вимірювань із національними системами координат.

Математична модель перетворення Гельмерта враховує:

- три параметри лінійного зміщення;
- три параметри обертання координатних осей;
- масштабний коефіцієнт.

Саме така модель дозволяє забезпечити високоточний перехід між різними геодезичними датумами та референцними системами координат.

Однак у процесі дослідження координатного перетворення було встановлено, що застосування різних джерел інформації щодо параметрів Гельмерта може призводити до виникнення розбіжностей у результатах

трансформації координат. Це пояснюється використанням різних наборів контрольних пунктів, методів обчислення параметрів, регіональних особливостей геодезичних мереж та різних реалізацій систем координат у програмному забезпеченні.

Відповідно до наведеної технологічної схеми координатного перетворення авторами було досліджено два основні підходи до перетворення просторових геодезичних та прямокутних координат — простий і складний.

Простий варіант передбачає виконання координатного переходу лише із використанням параметрів відповідних референц-еліпсоїдів без застосування додаткових параметрів просторового перетворення. Такий підхід характеризується простотою реалізації, однак може не враховувати локальні деформації координатних систем та накопичені похибки геодезичних мереж.

Складний варіант, окрім параметрів еліпсоїдів, включає також використання семи параметрів Гельмерта, що дозволяє врахувати просторові зміщення, обертання координатних осей та масштабні деформації між системами координат. Такий метод забезпечує вищу точність координатного переходу та краще узгодження геопросторових даних.

Контроль точності виконаних координатних перетворень здійснювався як окремо для кожного варіанта трансформації, так і шляхом взаємного порівняння отриманих результатів. Це дозволило оцінити вплив різних моделей координатного переходу на точність та узгодженість просторових даних.

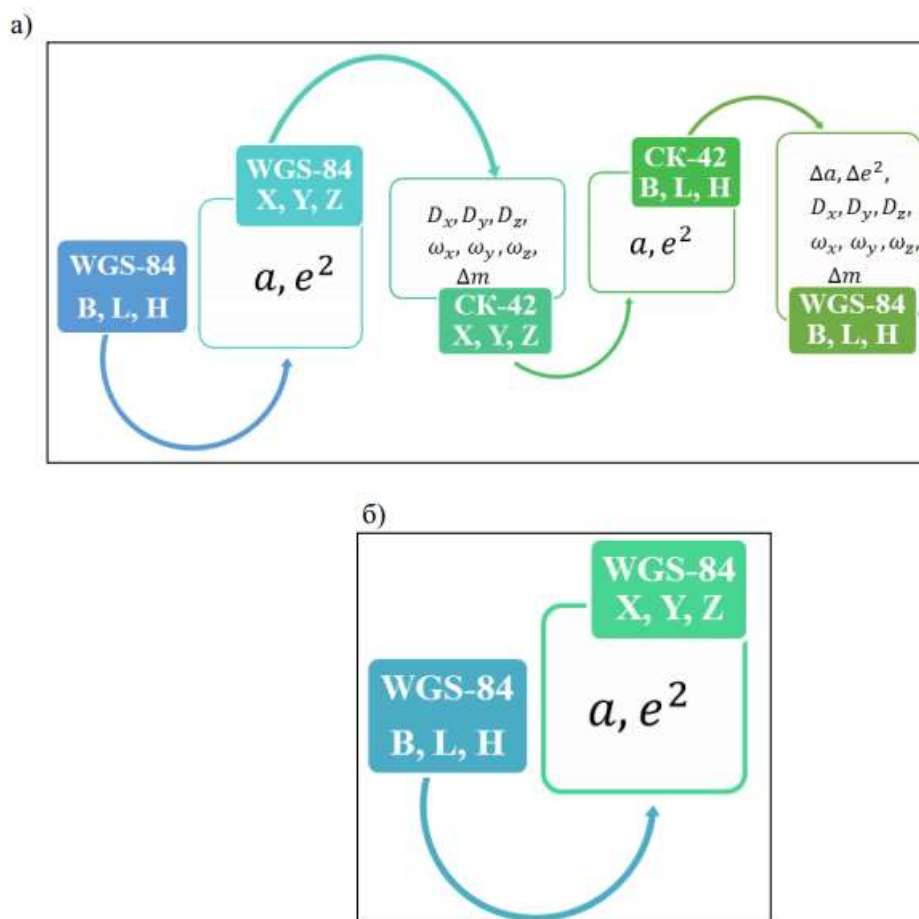


Рис. 2. Шляхи перетворення координат у системах WGS-84 та CK-42: а) – складний; б) – простий

Вихідними даними для проведення експериментальних досліджень були координати базової GNSS-станції мережі «NGC-NET», визначені у системах координат CK-42 та WGS-84. Значення координат, що використовувалися під час обчислень, наведені у таблиці 2.

Оскільки у дослідженні аналізувалися просторові прямокутні координати, для забезпечення максимальної точності обчислень різниці координат визначалися з точністю до восьмого знака після коми. Такий підхід дозволив мінімізувати втрати точності під час математичних перетворень і забезпечити коректність подальшого аналізу координатних розбіжностей між системами координат.

У таблиці 3 наведено результати порівняння координат, отриманих двома різними способами координатного перетворення. Проведений аналіз показав наявність суттєвих відмінностей між координатами у системі CK-42 та відповідними координатами у системі WGS-84.

Отримані розбіжності пояснюються низкою факторів, серед яких:

- відмінність референц-еліпсоїдів, що використовуються у системах координат;
- різні геодезичні дати;
- локальні деформації державних геодезичних мереж;
- накопичення похибок у вихідних картографічних матеріалах;
- застосування різних параметрів трансформації;
- особливості реалізації математичних моделей координатного переходу.

Особливо помітними є розходження у планових координатах, що свідчить про складність забезпечення точного переходу між локальною системою координат СК-42 та сучасною геоцентричною системою WGS-84. У ряді випадків такі розбіжності можуть досягати значних величин, що є критичним для виконання високоточних геодезичних, кадастрових та землевпорядних робіт.

Проведений експеримент підтверджує, що використання лише стандартних параметрів координатного перетворення не завжди забезпечує необхідну точність трансформації. Саме тому під час переходу до сучасних геоцентричних систем координат виникає необхідність застосування локальних трансформаційних моделей, трансформаційних полів та додаткового контролю точності отриманих координат.

Отримані результати також свідчать про необхідність подальшого вдосконалення технології координатного перетворення між системами СК-42, СК-63, WGS-84 та УСК-2000 для забезпечення високої узгодженості геопросторових даних у сучасних цифрових геоінформаційних системах.

Таблиця 1

Вихідні дані для експерименту			
Просторові геодезичні			
	B	L	H
CK42	50 02'11,86452" N	36 14'43,71188" E	204,914
WGS84	50 02'11,59100" N	36 14'37,96630" E	218,505
Просторові прямокутні			
	X	Y	Z
CK42	****600,135	****030,494	****649,664
WGS84	****624,883	****906,859	****568,948

Таблиця 2

Параметри Гельмерта для переходу від CK-42 в WGS-84								
№	Параметри Гельмерта							Джерело даних
	ΔX	ΔY	ΔZ	ω_x	ω_y	ω_z	m	
1	23,92	-141,27	-80,90	0	0,35	0,82	-0,00000012	ГОСТ 51794-2001
2	23,92	-141,27	-80,90	0	-0,35	-0,82	-0,00000012	Mapinfo 1013
3	27,00	-135,00	-84,50	0	0	-0,0000026	0,0000002263	ERDAS IMAGINE
4	24,00	-123,00	-94,00	-0,00000096	0,000001212	0,00000063	0,0000011	ERDAS IMAGINE
5	25,00	-141,00	-78,50	0	-0,35	-0,736	0	Tribble NL 2.90
6	24,00	-123,00	-94,00	-0,02	0,25	0,13	0,0000011	Mapinfo 1001
7	25,00	-141,00	-78,50	0	0	0	0	Delta Digital 5.0

Таблиця 3

Різниця між простим та складним переходом просторових геодезичних координат від CK-42 в WGS-84							
№	WGS-84			CK-42			Джерело даних
	B, с	L, с	H, м	B, с	L, с	H, м	
1	0,000059640	0,000352330	-0,005	-3,69086127	0,54503985	0,501	ГОСТ 51794-2001
2	0,000052680	0,000308750	-0,004	-3,07125635	-0,52167844	-0,884	Mapinfo 1013
3	0,000058110	0,000306200	-0,004	-3,53077312	0,0113744	-0,195	ERDAS IMAGINE
4	0,000045570	0,000273170	-0,004	-3,92737166	0,01032745	-0,205	ERDAS IMAGINE
5	0,000056880	0,000303110	-0,004	-2,99100452	-0,46700587	-0,373	Tribble NL 2.90
6	-0,023578050	0,000281290	-0,004	-4,05319485	0,11400843	-2,489	Mapinfo 1001
7	0,000059500	0,000323600	-0,004	-3,28103385	0,01171747	-0,193	Delta Digital 2017

Проведені дослідження показали, що використання різних значень параметрів Гельмерта у сучасних програмних комплексах створює суттєві труднощі під час автоматизації процесів координатного перетворення та обробки геопросторових даних. Відмінності у реалізації математичних моделей трансформації, використанні різних наборів параметрів та алгоритмів

обчислень призводять до виникнення розбіжностей у результатах координатного переходу між системами координат.

Особливо гостро ця проблема проявляється при формуванні трансформаційних полів для переходу між локальними системами координат СК-42, СК-63 та сучасними геоцентричними системами координат УСК-2000 і WGS-84. У таких умовах забезпечення єдності та узгодженості геодезичних даних потребує використання єдиних підходів до визначення параметрів трансформації та стандартизації методів координатного перетворення.

Важливою проблемою також залишається недостатній рівень методичного забезпечення процесу побудови трансформаційних полів. На сьогодні відсутні чітко регламентовані критерії щодо:

- вибору опорних пунктів;
- мінімальної кількості контрольних точок;
- рівномірності їх просторового розташування;
- конфігурації трансформаційної мережі;
- оцінювання точності та стабільності трансформаційних параметрів.

Нерівномірне розташування опорних точок або використання пунктів із недостатньою точністю координат може спричиняти локальні деформації трансформаційного поля та збільшення залишкових похибок координатного переходу. Тому питання оптимального розміщення контрольних пунктів є одним із ключових чинників забезпечення точності координатного трансформування.

Особливу увагу необхідно приділяти створенню єдиної методики побудови трансформаційних моделей, яка б враховувала регіональні особливості геодезичних мереж, локальні деформації координатного простору та характеристики вихідних картографічних матеріалів.

Удосконалення технологій координатного перетворення та впровадження стандартизованих параметрів трансформації дозволить:

- підвищити точність геодезичних і землепорядних робіт;

- забезпечити узгодженість кадастрових даних;
- покращити інтеграцію геопросторової інформації у GIS-системах;
- мінімізувати похибки при переході між системами координат;
- підвищити ефективність цифрового землеустрою та сучасних кадастрових технологій.

Отже, подальші наукові дослідження у сфері координатного трансформування повинні бути спрямовані на розроблення єдиних нормативних та методичних підходів до побудови трансформаційних полів, визначення параметрів переходу та забезпечення високої точності інтеграції геопросторових даних у сучасних геоінформаційних системах.

ВИСНОВОК ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ

У результаті проведених досліджень було проаналізовано особливості переходу від локальних та застарілих систем координат СК-42 і СК-63 до сучасних геоцентричних систем координат WGS-84 та УСК-2000. Встановлено, що проблема узгодженості координатних даних є однією з ключових у сфері сучасної геодезії, землеустрою та геоінформаційних технологій.

Дослідження показали, що головною причиною виникнення похибок під час координатного переходу є відсутність єдиних строгих параметрів трансформації між локальними радянськими системами координат та сучасними геоцентричними системами. Значний вплив на результати перетворення мають також локальні деформації геодезичних мереж, відмінності параметрів референц-еліпсоїдів, неоднорідність вихідних картографічних матеріалів та використання різних параметрів Гельмерта у програмних комплексах.

У ході роботи було встановлено, що застосування локальних трансформаційних полів дозволяє підвищити точність координатного переходу, однак ефективність такого підходу значною мірою залежить від правильного вибору опорних пунктів, їх кількості, просторової конфігурації та точності вихідних координат.

Проведений аналіз підтвердив, що використання GNSS-технологій та сучасних геоцентричних систем координат забезпечує значно вищу точність визначення координат порівняно із традиційними локальними системами. При цьому найбільша узгодженість геопросторових даних досягається за умови використання високоточних супутникових вимірювань, сучасних математичних моделей трансформації та стандартизованих параметрів координатного переходу.

У процесі дослідження також встановлено, що різні програмні засоби можуть формувати відмінні результати координатного перетворення через

використання різних реалізацій параметрів трансформації та алгоритмів обробки даних. Це ускладнює автоматизацію процесів інтеграції геопросторової інформації та потребує створення єдиної нормативно-методичної бази координатного трансформування.

Отримані результати підтверджують необхідність подальшого вдосконалення технологій координатного переходу між системами СК-42, СК-63, WGS-84 та УСК-2000, а також розроблення єдиних підходів до побудови трансформаційних полів і визначення параметрів перетворення.

Практичне значення виконаних досліджень полягає у можливості використання отриманих результатів під час:

- виконання геодезичних та кадастрових робіт;
- створення цифрових топографічних планів;
- інтеграції архівних картографічних матеріалів у сучасні GIS-системи;
- оновлення кадастрових даних;
- забезпечення високої точності визначення меж земельних ділянок.

Таким чином, перехід до геоцентричних систем координат є необхідною умовою розвитку сучасної геодезії, землеустрою та цифрових геоінформаційних систем, а забезпечення точності та узгодженості координатних даних залишається одним із пріоритетних напрямів наукових і практичних досліджень у цій сфері.

ВИСНОВОК

У результаті проведених досліджень було проаналізовано особливості переходу від локальних та застарілих систем координат СК-42 і СК-63 до сучасних геоцентричних систем координат WGS-84 та УСК-2000. Встановлено, що проблема узгодженості координатних даних є однією з ключових у сфері сучасної геодезії, землеустрою та геоінформаційних технологій.

Дослідження показали, що головною причиною виникнення похибок під час координатного переходу є відсутність єдиних строгих параметрів трансформації між локальними радянськими системами координат та сучасними геоцентричними системами. Значний вплив на результати перетворення мають також локальні деформації геодезичних мереж, відмінності параметрів референц-еліпсоїдів, неоднорідність вихідних картографічних матеріалів та використання різних параметрів Гельмерта у програмних комплексах.

У ході роботи було встановлено, що застосування локальних трансформаційних полів дозволяє підвищити точність координатного переходу, однак ефективність такого підходу значною мірою залежить від правильного вибору опорних пунктів, їх кількості, просторової конфігурації та точності вихідних координат.

Проведений аналіз підтвердив, що використання GNSS-технологій та сучасних геоцентричних систем координат забезпечує значно вищу точність визначення координат порівняно із традиційними локальними системами. При цьому найбільша узгодженість геопросторових даних досягається за умови використання високоточних супутникових вимірювань, сучасних математичних моделей трансформації та стандартизованих параметрів координатного переходу.

У процесі дослідження також встановлено, що різні програмні засоби можуть формувати відмінні результати координатного перетворення через

використання різних реалізацій параметрів трансформації та алгоритмів обробки даних. Це ускладнює автоматизацію процесів інтеграції геопросторової інформації та потребує створення єдиної нормативно-методичної бази координатного трансформування.

Отримані результати підтверджують необхідність подальшого вдосконалення технологій координатного переходу між системами СК-42, СК-63, WGS-84 та УСК-2000, а також розроблення єдиних підходів до побудови трансформаційних полів і визначення параметрів перетворення.

Практичне значення виконаних досліджень полягає у можливості використання отриманих результатів під час:

- виконання геодезичних та кадастрових робіт;
- створення цифрових топографічних планів;
- інтеграції архівних картографічних матеріалів у сучасні GIS-системи;
- оновлення кадастрових даних;
- забезпечення високої точності визначення меж земельних ділянок.

Таким чином, перехід до геоцентричних систем координат є необхідною умовою розвитку сучасної геодезії, землеустрою та цифрових геоінформаційних систем, а забезпечення точності та узгодженості координатних даних залишається одним із пріоритетних напрямів наукових і практичних досліджень у цій сфері.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Боровий В. Застосування нової референцної системи координат УСК-2000 / В. Боровий, О. Зарицький // Землевпорядний вісник. – 2017. – № 5. С. 22 – 26.
2. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. ГОСТ 32453-2017. М.: Стандартинформ, 2017. 23 с. Режим доступа: http://shturman-tof.ru/Bibl/Bibl_4_st_ucebnici/2018_gost/gost_r_32453-2017.pdf.
3. Задемленюк А.В. Про сучасний стан координатного забезпечення та перспективи його вдосконалення для задач кадастру / А.В. Задемленюк // Геодезія, картографія і аерофотознімання. Вип. 70. - 2008. с. 14-20. . – Режим доступа: http://vlp.com.ua/files/03_62.pdf.
4. Заєць І. Основні засади використання геодезичної референцної системи координат УСК-2000 для забезпечення ведення Державного земельного кадастру / І. Заєць // 10 Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, випуск І (27), 2014. – с. 9-11.
5. Закатов П. С. Курс высшей геодезии / П.С. Закатов. – М.: Недра, 1976. – 511 с.
6. Кучер О.В. Внедрение государственной референцной системы координат Украины // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2012. – № 3(46). – С. 67–73.
7. Кучер О. Дослідження референцних систем координат для території України / Кучер О., Ренкевич О., Лепетюк Б. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. пр. – Л., 2002. – С. 15–28.
8. Кучер О. Науково-технічне забезпечення впровадження референцної системи координат для території України / Кучер О., Ренкевич О., Лепетюк Б., Заєць І. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. пр. – Л., 2003. – С. 23–31.

9. Марченко О.М. Референсні системи в геодезії: навч. Посібник / О.М. Марченко, К.Р. Третяк, Н.П. Ярема. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 216 с.

10. Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України «Порядок використання Державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000 при здійсненні робіт із землеустрою» № 509 від 02.12.2016 р. // [Електронний ресурс] – 2016. – Режим доступу: <http://renimvk.od.ua/engine/download.php?id=1544>.

11. Паспорти Державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000 // [Електронний ресурс] — 2013. – Режим доступу: http://dgm.gki.com.ua/files/uploads/documents/Description_of_Transformation_UA_UCS_2000_to_ETRS89%20New.pdf.

12. Постанова Кабінету Міністрів України «Деякі питання застосування геодезичної референтної системи координат» № 1259 від 22.09.2004 р. // [Електронний ресурс] — 2004. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1259-2004-%D0%BF>.

13. Програма створення автоматизованої системи ведення державного земельного кадастру [Постанова кабінету міністрів України № 1355 від 2 грудня 1997 року] [документ втратив чинність 23.07.2013] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1355-97-%D0%BF>.

14. Савчук С.Г. До питання про точне перетворення координат // Вісник геодезії та картографії. – 2003. – № 3. – С. 6–9.

15. Савчук С. Практичні аспекти застосування нової референцної системи УСК-2000. 17-та Міжнародна науковотенічна конференція GEOFORUM"2012. Львів-Яворів, Україна 2012. р. 22.

16. Черняга П. Переваги та недоліки систем координат та геодезичних проекцій під час ведення земельного кадастру / П. Черняга, С. Кубах // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, випуск II(20), 2010. – с. 62-66.

17. Groten, E. (2000). Parameters of Common Relevance of Astronomy, Geodesy, and Geodynamics. *Journal Of Geodesy*, 74(1), 134-140. doi: 10.1007/s00190-000-0134-0.
18. Jekeli, C. (2012) Geometric reference systems in geodesy. Ohio State University. Retrieved from https://kb.osu.edu/dspace/bitstream/handle/1811/51274/Geometric_Reference_Systems_2012.pdf.
19. Molnár, G., & Timár, G. (2005). Determination of the parameters of the abridging Molodensky formulae providing the best horizontal fit. *Geophysical Research Abstracts*, 7, 01018. doi: 10.13140/2.1.2842.9769.
20. Novikova, E., Palamar, A., Makhonko, S., Barna, A., & Privalova, O. (2018). Transformation Parameters between UCS-2000 and WGS-84. *Geodesy And Cartography*, 44(2), 50-54. doi: 10.3846/gac.2018.1830.
21. Rapp R.H. 1991. Geometric geodesy. Part I. The Ohio State University. Department of Geodetic Science and Surveying. Columbus, Ohio, 189 pp.
22. Rapp R.H. 1993. Geometric geodesy. Part II. The Ohio State University. Department of Geodetic Science and Surveying. Columbus, Ohio, 225 pp.
23. Stuifbergen, N. (2009). Wide Zone Transverse Mercator Projection. Dartmouth, Nova Scotia: Bedford Institute of Oceanography. Retrieved from <http://publications.gc.ca/site/eng/364667/publication.html>.
24. Timár, G., & Molnár, G. (2013). Map grids and datums. Eötvös Lóránd University. Retrieved from <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/MapGridsAndDatums/index.html>.
25. Torge, W. (2001). *Geodesy*. Berlin: W. de Gruyter.

ДОДАТОК А

ПРОГРАМА НА МОВІ VISUAL BASIC ДЛЯ EXCEL ДЛЯ ОБЧИСЛЕННЯ ВЕЛИЧИНИ

$dP^{(1)}$

```
Sub P1()  
  
    'Параметри еліпсоїда Красовського  
    a = 6378245  
    e2 = 0.006693421623  
  
    'Параметри Гельмерта між СК-63 та УСК-2000  
    dX = 0.6766  
    dY = -19.6292  
    dZ = -2.6725  
    Rx = 0  
    Ry = 0.35 / 3600 * PI / 180  
    Rz = 0.736 / 3600 * PI / 180  
    mu = 0.00000000174  
  
    'Початок циклу  
    For i = 0 To 11  
        B = (i + 43) * PI / 180  
        Mr(i) = a * (1 - e2) / Sqr(1 - e2 * Sin(B) ^ 2)  
    Next i  
  
    For n = 0 To 19  
        L = (n + 22) * PI / 180  
        For i = 0 To 10  
            B = (i + 43) * PI / 180  
            dB(i, n) = (-(dX * Cos(L) + dY * Sin(L)) * Sin(B) + dZ * Cos(B)) /  
Mr(i) + (Rx * Sin(L) - Ry * Cos(L)) * (1 + e2 * Cos(2 * B)) - 0.5 * mu * e2 *  
Sin(2 * B)  
            dP(i, n) = -dB(i, n) * Tan(B) * 10000  
        Next i  
    Next n  
  
    'Кінець циклу  
  
    'Виведення результату на печать  
    Sch = 0  
    For n = 0 To 19  
        L = (n + 22) * PI / 180
```

```
Lgr = n + 22
For i = 0 To 10
    B = (i + 43) * PI / 180
    Bgr = i + 43
    Sch = Sch + 1
    Лист1.Cells(Sch, 1) = Bgr 'Широта
    Лист1.Cells(Sch, 2) = Lgr 'Довгота
    Лист1.Cells(Sch, 3) = dP(i, n) 'Скривлення площі
Next i
Next n

End Sub
```