

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет природокористування
Факультет землевпорядкування та туризму
Кафедра геодезії і геоінформатики

Кваліфікаційна (дипломна) робота

освітнього ступеня «Магістр»

на тему: **«ЗГУЩЕННЯ ГЕОДЕЗИЧНОЇ МЕРЕЖІ МЕТОДОМ GPS
СПОСТЕРЕЖЕНЬ ТА З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОННИХ
ТАХЕОМЕТРІВ»**

Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій»

Виконав: студент групи ЗВ-61

Петрина Любомир Богданович

Науковий керівник: к.е.н., доцент

Бочко Олександр Іванович

Рецензент: _____

Львів 2024

РЕФЕРАТ

Згущення геодезичної мережі методом GPS спостережень та з використанням електронних тахеометрів. Петрина Л.Б. Кваліфікаційна робота. Кафедра геодезії і геоінформатики. – Львівський національний університет природокористування, 2024.

76 с. текстової частини, 17 таблиць, 25 рисунків, 26 літературних джерел, презентація.

У магістерській роботі проведено: аналіз залежності точності від тривалості спостережень, відстаней між приймачами та їх типів; дослідження впливу комбінованого використання GPS і ГЛОНАСС, кута відсічки та типів ефемерид. Використано методи аналізу похибок, математичну статистику й апроксимацію для обробки супутникових даних.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню оцінки точності геодезичних мереж, створених із використанням ГНСС. Результати дозволять вдосконалити методику формування супутникових мереж.

Ключові слова: ГЕОДЕЗИЧНА ОСНОВА, ЕЛЕКТРОННИЙ ТАХЕОМЕТР, ГНСС, GPS, ДЕРЖАВНА ГЕОДЕЗИЧНА МЕРЕЖА.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 СУЧАСНІ МЕТОДИ СТВОРЕННЯ ДЕРЖАВНИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ (ДГМ)	7
1.1 Основні положення щодо створення державних геодезичних мереж (ДГМ)	7
1.2 Методика прокладання полігонометричного ходу	12
2 СТВОРЕННЯ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ МЕТОДАМИ GNSS	18
2.1 Глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС)-основні засади	18
2.2 Основні засади та призначення міжнародних ГНСС-мереж	26
2.3 Аналіз ГНСС-мережі в Україні	29
2.4 Згущення геодезичної мережі з використанням електронних тахеометрів	33
3 ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ПОЛОЖЕННЯ ПУНКТИВ В МЕРЕЖАХ, СТВОРЕНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ ГНСС	38
3.1 Залежність точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень та відстані між одночасно працюючими приймачами	38
3.2 Порівняння точності положення пунктів, визначених використовуючи системи NAVSTAR GPS та ГЛОНАСС	51
3.3 Дослідження залежності точності визначення координат пунктів від кута відсічки в мережах, створюваних з допомогою систем GPS і ГЛОНАСС	59
4 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	70
ВИСНОВКИ	73
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	74

ВСТУП

Сучасний розвиток геодезії відзначається вдосконаленням традиційних методів і впровадженням супутникових технологій, які перевершують наземні за точністю, швидкістю, економічністю та зручністю. Вони дозволяють визначати координати пунктів без взаємної видимості, сприяючи створенню й реконструкції геодезичних мереж, дослідженням у геодинаміці та науці. Для ефективності таких мереж необхідно постійно оновлювати методики відповідно до технологічного прогресу. Інженерно-геодезичні завдання, зокрема створення й реконструкція мереж, виконуються із застосуванням ГНСС. У системі NAVSTAR GPS поліпшено стабільність генераторів, кількість супутників, алгоритми обробки даних і наземну інфраструктуру, що підвищило точність координат і прогнозування ефемерид. Паралельно функціонують ГЛОНАСС, Galileo та Compass, а багатосистемні приймачі дозволяють комбінувати сигнали кількох систем, зокрема GPS і ГЛОНАСС, що потребує вивчення їхнього впливу на точність. Водночас залишаються невирішеними питання визначення оптимальної тривалості спостережень і уточнення параметрів, як-от кут відсічки супутників та тип ефемерид.

Дослідженням точності супутникових методів займалися як вітчизняні, так і зарубіжні вчені, серед яких Я. Костецька, С. Савчук, К. Третьак, В. Hofmann-Wellenhof, J. Śledzinski та інші.

Ця робота присвячена дослідженню оцінки точності геодезичних мереж, створених із використанням ГНСС. Результати дозволять вдосконалити методику формування супутникових мереж.

У магістерській роботі проведено: аналіз залежності точності від тривалості спостережень, відстаней між приймачами та їх типів; дослідження впливу комбінованого використання GPS і ГЛОНАСС, кута відсічки та типів ефемерид. Використано методи аналізу похибок, математичну статистику й апроксимацію для обробки супутникових даних.

1. СУЧАСНІ МЕТОДИ СТВОРЕННЯ ДЕРЖАВНИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ (ДГМ)

1.1. Основні положення щодо створення державних геодезичних мереж (ДГМ)

Державна геодезична мережа (ДГМ) забезпечує розповсюдження координат по Україні та є основою для створення інших мереж. Її пункти рівномірно розташовані, закріплені спеціальними центрами та мають зовнішні знаки для візування. ДГМ поділяється на планову (створюється супутниковими методами, триангуляцією, трилатерацією та полігонометрією) і висотну мережі.

Планова мережа включає:

- астрономо-геодезичну мережу 1 класу (АГМ-1, будується супутниково),
- мережі 2 і 3 класів (використовують триангуляцію, трилатерацію та GPS).

Для зйомки в масштабах 1:5000–1:500 застосовують мережі згущення (4 класу, 1-го і 2-го розрядів). ДГМ забезпечує єдину координатну систему, картографування, кадастри, навігацію, моніторинг довкілля, геодинамічні дослідження та аналіз гравітаційного поля. Координати визначають у загальноземній системі (GPS 1980) та УСК-2000 (адаптована до України). У перехідний період використовують СК-42 на основі еліпсоїда Красовського.

Методи створення мереж:

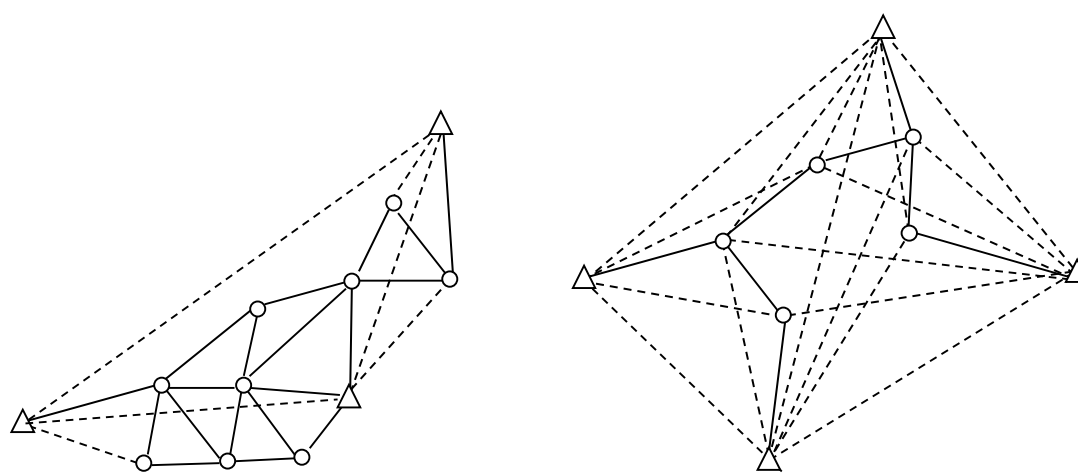
- **Триангуляція:** мережі другого та третього класів із точним вимірюванням кутів.
- **Трилатерація:** замість кутів вимірюють сторони трикутників; точність: до 0,03 м (2 клас) і 0,04 м (3 клас).
- **Полігонометрія:** визначають координати пунктів через вимірювання відстаней і кутів.

Координати обчислюють у просторовій системі X, Y, Z або на референц-еліпсоїді (широта B , довгота L , висота H). Дані можна переводити в площину Гаусса-Крюгера (x, y).

Для топографічного знімання масштабу 1:25000 та 1:10000 густота ДГМ має бути щонайменше 1 пункт на 30 км², для масштабу 1:5000 – 1 пункт на 20–30 км², а для масштабів 1:2000 і більше – 1 пункт на 5–25 км².

Розрядні геодезичні мережі згущення створюють для топографічного знімання, проектування та будівництва, компенсуючи недостатню густоту пунктів державної геодезичної мережі. Вони базуються на державних пунктах і поділяються за точністю на мережі 4 класу та 1 і 2 розрядів.

Мережі згущення створюють методами GPS-спостережень, полігонометрії, трилатерації та триангуляції. Полігонометрія є найпоширенішим методом, особливо на забудованих чи залісених територіях, завдяки можливості виконувати як лінійні, так і кутові вимірювання. Триангуляцію використовують у гірських місцевостях, а трилатерацію – за неможливості вимірювати кути.



а) GPS-мережа у вигляді

зімкнутих геометричних фігур

б) Тип радіальної

мережі з контролем

Умовні позначення

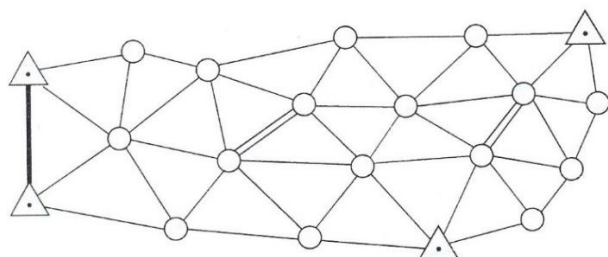
△ – вихідні пункти – визначувані пункти
 – вектори, довжина яких взначається із GPS-спостережень

 ————— – вектори між пунктами де є оптична видимість.

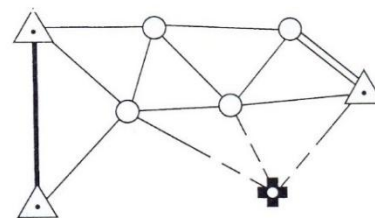
Рис. 1.1. Основні типи GPS-мережі.

Пункти мережі розташовують у легкодоступних місцях із забезпеченням довговічності та видимості між ними. У забудованих районах їх закріплюють на стінах чи дахах будівель. Вибрані пункти слугують основою для знімальних робіт.

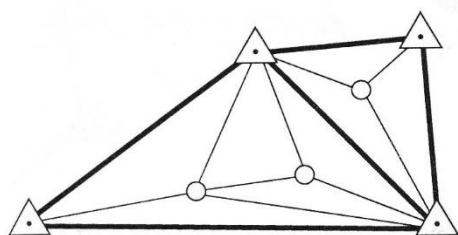
Основні схеми побудови GPS-мереж 4 класу, 1 та 2 розрядів подібні до ДГМ, а точність визначення сторін становить 3–10 мм. У триангуляційних мережах вимірюють кути та одну-дві сторони для контролю.



Суцільна триангуляційна мережа



Ланка трикутників та засічка



Вставки в трикутники

Умовні позначення:







-  – Вихідний геодезичний пункт
-  – Вихідна сторона триангуляції
-  – Пункт, який визначається
-  – Базис
-  – Сторони триангуляції з двосторонніми напрямками
-  – Односторонні напрямки

Рис. 1.2. Схеми побудови триангуляції 4 класу та 1 і 2 розрядів.

Ланки трикутників повинні опиратися на два геодезичні пункти (зазвичай на початку і наприкінці) та дві прилеглі сторони. Суцільна мережа базується на трьох вихідних пунктах і двох вихідних сторонах. Вихідними можуть бути сторони полігонометрії, трилатерації чи триангуляції вищих класів, якщо їх довжина не менше 1 км і точність відповідає Інструкції.

Трилатераційні мережі формують як ланки трикутників, геодезичні чотирикутники, центральні системи чи суцільні мережі. У трилатерації вимірюють лише довжини сторін, використовуючи світловіддалеміри, електронні тахеометри або радіовіддалеміри. За формою ці мережі подібні до триангуляційних, але кути в них не вимірюються.

Світловіддалеміри підвищили точність і продуктивність полігонометрії, що важливо для створення геодезичних мереж, моніторингу деформацій,

дослідження рухів земної кори та прогнозування землетрусів. Щільність пунктів сягає 4 на км² у містах і 1 у селах, базуючись на державних геодезичних мережах і мережах згущення.

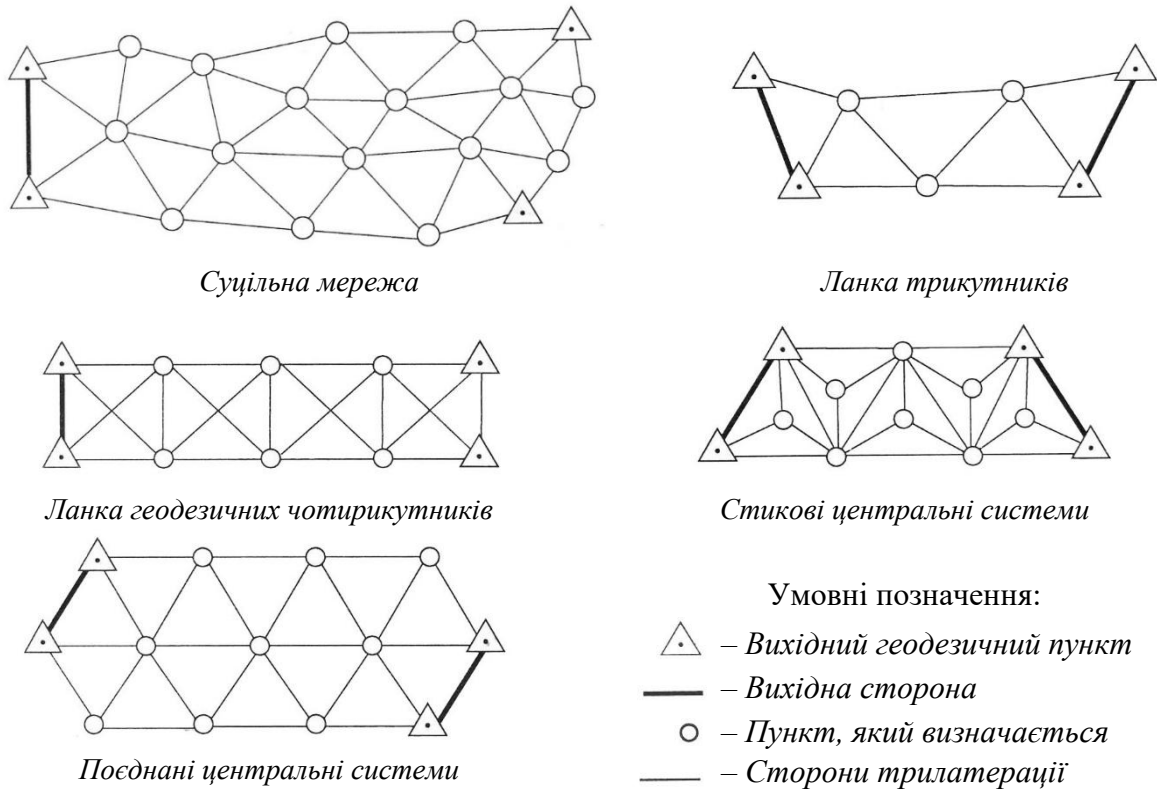


Рис. 1.3. Схеми побудови трилатерації.

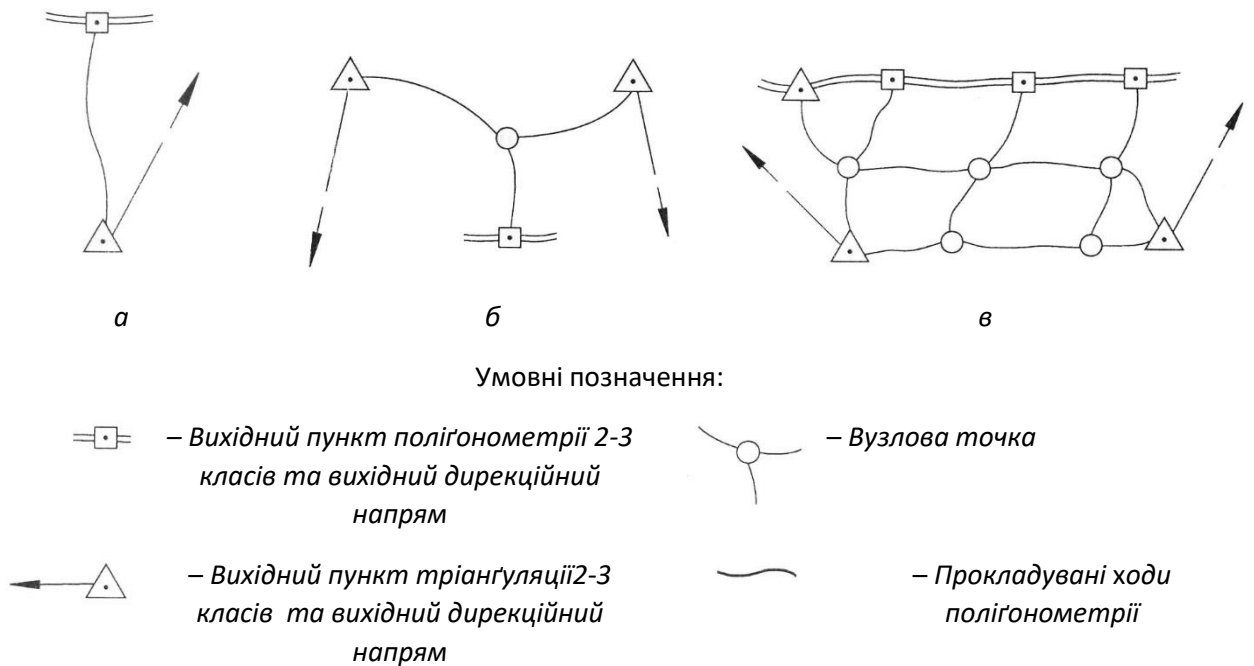


Рис. 1.4. Схеми побудови полігонометричних мереж 4 класу, 1 та 2 розрядів.

Процес створення мереж включає проектування, рекогностування, прокладання ходів, перевірку приладів, вимірювання та нівелювання. Зовнішні знаки встановлюються через 500–800 м залежно від класу мережі, використовуючи тури, металеві піраміди, жовті стовпи чи кургани. У містах знаки закріплюють на дахах будівель.

Для великомасштабного знімання мережі створюються згущенням ДГМ. Нівелювання III і IV класів використовується для згущення висотної мережі, а густота визначається проектом залежно від масштабу й рельєфу. При відсутності реперів технічне нівелювання закріплюється знаками на відстані до 3 км.

Результати включають схеми мереж із прив'язками, дані обстежень, обчислення, акти контролю, журнали вимірювань, картки знаків і супутникові дані в електронному вигляді.

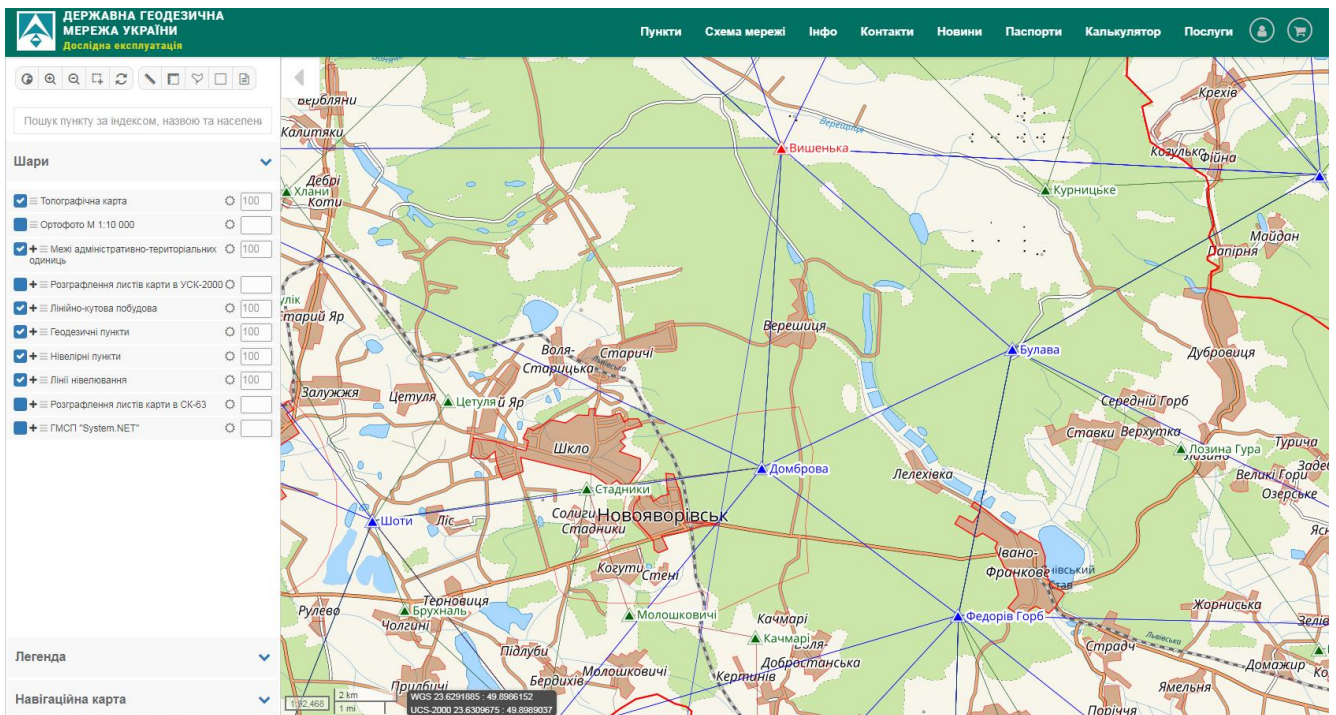


Рис. 1.5 – Державна геодезична мережа України [5]

Топографічне знімання виконується різними методами: горизонтальним, висотним, тахеометричним, стереотопографічним, фототопографічним, аерофототопографічним, за допомогою GPS або їх комбінацій. Роботи проводять у сприятливий сезон, допускається сніговий покрив до 20 см. Плани з більшим шаром снігу потребують оновлення. Інженерно-топографічні плани у масштабах

1:200–1:10 000 створюють на основі актуального знімання або матеріалів віком до 2 років. Масштаб 1:200 використовують для територій зі складною інфраструктурою. Технічні вимоги визначає замовник. Для містобудівної документації, магістралей і промислових об'єктів застосовують аерофототопографічний і наземний методи.

Плани можуть бути цифровими або графічними; цифрові створюють автоматизовано з відповідною точністю. Вони використовують класифікатори топографічної інформації. Номенклатуру планів визначають програмою вишукувань. Матеріали мають відповідати інструкціям і проходити польову перевірку. У звіт включають журнали обстежень, зариси, плани й акти контролю, а за використання супутникових приладів – журнали вимірювань.

1.2 Методика прокладання полігонометричного ходу

Полігонометричні мережі 4 класу, 1 і 2 розрядів складаються з ходів або їх систем, де кожен хід спирається на два вихідні пункти. У разі відсутності видимості між пунктами допускається прокладання ходу без кутової прив'язки з контролем дирекційних кутів або замкнутого ходу з передачею двох дирекційних кутів. Висячі ходи заборонені. Довжина сторін зі світловіддалемірами може збільшуватися на 30%, а лінійна нев'язка у виняткових випадках допускається до 10 см. Відстань між пунктами паралельних ходів має бути не менше 2,5 км для полігонометрії 4 класу та 1,5 км для 1 розряду. Якщо пункти 1 розряду ближче 1,5 км до пунктів 4 класу, прокладається хід 1 розряду. Точність оцінюється за середніми квадратичними помилками, враховуючи вихідні пункти з відомими координатами.

В роботі виконано попередню оцінку точності ходів та наведено розрахунки для окремого ходу полігонометрії 4 класу. Дана характеристика запроєктованого ходу: довжина ходу $[S] = 9,1$ км за допустимої $[S] = 14$ км; довжина замикаючої $L = 7,4$ км; кількість ліній $n = 9$, за допустимої – $n_{\text{доп}} = 15$;

середня довжина лінії $S_{СЕР} = \frac{[S]}{n} = 1011,11$ м, за оптимальної довжини $S_{ОПТ} = 500$ м.; максимальна довжина лінії $S_{МАКС} = 1\ 400$ м, за допустимої довжини $S_{МАКС} = 3\ 000$ м; мінімальна довжина $S_{МИН} = 575$ м, за допустимої довжини $S_{МИН} = 250$ м.

Таблиця 1.1.

Параметри полігонометричного ходу (умовні координати)

Назва пунктів	S , м	y , м	x , м	$(D_{u,i})$, км	$(D_{u,i})^2$ км ²	η , м	α , °
1	725	0	0	3,70	13,67	638	48
2		-175	700	2,98	8,87	463	47
3	1375	-1325	1450	2,30	5,28	688	57
	1100						
4	1400	-1700	2525	1,54	2,38	1063	54
	700						
5	950	-400	4100	0,52	0,27	238	15
	575						
6	1000	-450	5050	1,42	2,02	188	12
	1000						
7	1000	-925	5375	1,76	3,08	288	18
	1275						
8	1275	-775	6400	2,76	7,62	138	67
	1275						
9	1275	0	7400	3,81	14,53	638	56
Σ	9100	-6375	36425		57,77		

Знаменник відносної нев'язки $T = 25\ 700$; $[S] = 9,1$ км; довжина замикаючої $L = 7,4$ км; кількість сторін $n = 9$; середня квадратична похибка виміру кута $m''_{\beta} = 3''$, $S_{СЕР} = 1011,11$ м, $S_{МИН} = 600$ м. За формулами отримаю:

$$\eta = \frac{7400}{24} = 308,333\text{ м}; \quad \eta_{ГРАН} = 3 \cdot 308,333 = 925\text{ м}; \quad tg\alpha = \frac{1}{7} = 0,1428; \quad \alpha = 8^\circ;$$

$\alpha_{ГРАН} = 3 \cdot 8^\circ = 24^\circ$. Отже, хід буде витягнутим, якщо: $\eta_{МАКС} \leq 925$ м і $\alpha_{МАКС} \leq 24^\circ$.

Згідно наших розрахунків $\eta_{МАКС} = 1063$ м, а $\alpha_{МАКС} = 67^\circ$. Порівнявши ці значення

з граничними, можемо зробити висновок, що запроєктований хід зігнутий, тому що $\alpha_{\text{МАКС}} > \alpha_{\text{ГРАН}}$ та $\eta_{\text{МАКС}} > \eta_{\text{ГРАН}}$.

$$X_{\text{Ц}} = \frac{36425}{10} = 3642,5 \text{ м}; \quad Y_{\text{Ц}} = \frac{-6375}{10} = -637,5 \text{ м}.$$

Середня квадратична похибка m_s вимірювання ліній світловіддалеміром Sokkia SET 610 K. $S_{\text{СЕР}} = 1011,11 \text{ м} = 1011100 \text{ мм}$ маємо $m_s = (2 + 2 \cdot D \times 10^{-6}) \text{ мм}$.
 $m_s = (2 + 2 \cdot 1011100 \times 10^{-6}) = 4,02 \text{ мм}$.

У світловіддалемірній полігонометрії витягнутий хід, еквівалентний (за довжиною) зігнутому, поступається йому у точності, і тому розрахунок виконую за формулою для витягнутих ходів, яка є простіша за формулу для зігнутих ходів:

$$M^2 = m_s^2 \cdot n + \frac{(m''_{\beta})^2}{(\rho'')^2} \cdot [S]^2 \cdot \frac{n+3}{12} \qquad M^2 = m_s^2 \cdot n + \frac{(m''_{\beta})^2}{(\rho'')^2} \cdot [D_{\text{ци}}^2]$$

$$M = \sqrt{4,02^2 \cdot 9 + \frac{3^2}{206265^2} \cdot 9100000^2 \cdot \frac{9+3}{12}} = 132,90 \text{ мм}.$$

$$f_{\text{ВДН}} = \frac{2 \cdot M}{[S]} = \frac{2 \cdot 132,90}{9100000} = \frac{1}{34235} < \frac{1}{25700}.$$

Отже точність запроєктованого полігонометричного ходу відповідає заданій точності полігонометричного ходу 4 класу.

Основними похибками світловіддалемірних вимірювань є: похибка ($m_{S_{\Delta\varphi}}$) різниці фаз; похибка (m_{S_k}) приладової поправки; похибка (m_{S_g}) циклічної поправки; похибка ($m_{S_{\text{ц.р}}}$) за центрування та редукцію; похибка (m_{S_h}) зведення ліній до горизонту; похибка (m_{S_f}) основної модулюючої частоти; похибка (m_{S_v}) робочої швидкості світла.

$$m_s = \sqrt{m_D^2 + m_{S_h}^2} = 4,94 \text{ мм}$$

Похибка m_D вимірної горизонтальної проєкції лінії визначається за формулою:

$$m_D = \sqrt{\left(\frac{v}{4 \cdot \pi \cdot f}\right)^2 \cdot \frac{m_{S_{\Delta\varphi}}^2}{\rho^2} + m_{S_k}^2 + m_{S_g}^2 + m_{S_{\text{ц.р}}}^2 + \left[\left(\frac{m_{S_f}}{f}\right)^2 + \left(\frac{m_{S_v}}{v}\right)^2\right] \cdot D^2} = 4,93 \text{ мм}$$

де $\pi = 3,1416$, ν – робоча швидкість світла, f – частота.

Похибка m_{Sh} має випадковий характер і її обчислюю за формулою:

$$m_{Sh} = \frac{h}{S} \cdot m_h, \quad m_{Sh} = \frac{22,5}{575} \cdot 7,58 = 0,30 \text{ мм}.$$

Допуски на окремі джерела похибок випадкового $m_{S_{ВПП}}$ і систематичного $\Delta_{S_{СИСТ}}$ характеру під час вимірювання сторони ходу:

$$m_{S_{ВПП}} = \frac{[S]}{2T \cdot \sqrt{1+Q^2} \cdot \sqrt{6} \cdot \sqrt{n}} = \frac{9100000 \text{ мм}}{2 \cdot 25700 \cdot \sqrt{1+5^2} \cdot \sqrt{6} \cdot \sqrt{9}} = 4,72 \text{ мм};$$

$$\Delta_{S_{СИСТ}} = \frac{[S]}{T \cdot \sqrt{1+Q^2} \cdot \sqrt{6} \cdot n} = \frac{9100000 \text{ мм}}{25700 \cdot \sqrt{1+5^2} \cdot \sqrt{6} \cdot 9} = 3,15 \text{ мм}.$$

Похибка $m_{S_{\Delta\phi}}$ різниці фаз, випадкова й розрахункова величина її впливу становить 6,6 мм. Саму похибку $m_{S_{\Delta\phi}}$ розрахуємо за формулою:

$$m_{S_{\Delta\phi}} = \frac{4 \cdot m_{S_{ВПП}} \cdot \rho^\circ \cdot \pi}{\lambda} = \frac{4 \cdot 4,72 \cdot 57,3 \cdot 3,1416}{20000} = 0,17^\circ.$$

Похибка $m_{S_{\Delta\phi}}$ залежить від кількості прийомів, рівня сигналу тощо. Максимальна різниця вимірних значень між прийомами дозволяється 18,49 мм.

Похибка приладової поправки Δ_{S_k} світловіддалеміра є систематичною та залежить від методики її визначення на взірцевому базисі й стабільності роботи приладу. Жорсткий допуск у Δ_{S_k} 1,63 мм вимагає зменшення цього джерела похибок, що досягається еталонуванням приладу на базисі 1-го розряду.

Циклічна похибка m_{S_g} фазометра зазвичай має випадковий характер. Її досліджують на еталонному базисі та будують графік, який використовується для врахування цієї похибки. Вплив похибки її визначення також є випадковим. Зазвичай похибка становить $m_{S_g} = 1-3 \text{ мм}$, тому допуск дотримується без проблем.

Похибка центрування та редукації $m_{S_{ч,р}}$ електронного тахеометра й відбивача є випадковою, тому допуск встановлено на рівні 3,0 мм. Оптичні центрири забезпечують точність 1 мм, що дозволяє компенсувати інші похибки.

Похибка визначення робочої швидкості світла m_{S_0} здебільшого випадкова й несуттєва для вимірювання полігонометрії 4 класу, 1 і 2 розрядів. За умови вимірювання температури та тиску на обох кінцях лінії, похибка температури не перевищує 1° , а тиску – 1 мм рт. ст., що спричиняє похибку у вимірюванні лінії на 1 км $m_{S_{t,p}} < 1,5 \text{ мм}$.

Основними похибками кутових вимірювань є: похибка редукції e_1 ; похибка центрування e_2 ; приладової поправки; похибка власне вимірювання; похибки впливу зовнішнього середовища; похибки вихідних даних.

$$m_{\beta_{\text{вип}}} = \frac{206265'' \cdot 5 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot 25700 \cdot \sqrt{1+5^2} \cdot \sqrt{9+3}} = 1,41'', \quad \Delta_{\beta_{\text{сист}}} = \frac{2 \cdot 206265'' \cdot 5}{25700 \cdot (9+1) \cdot \sqrt{1+5^2}} = 1,37''.$$

Обчислимо допуски на окремі джерела похибок:

Похибку e_1 редукції візирної цілі визначимо за формулою:

$$e_1 = \frac{m_{\beta_{\text{вип}}} \cdot S_{\text{СЕР}}}{\rho''} = \frac{1,61'' \cdot 1011100 \text{ мм}}{206265''} = 7,87 \text{ мм} \quad \text{Для } S_{\text{МІН}} = 565 \text{ м отримаємо } e_1 = 4,38 \text{ мм}.$$

Похибку e_2 за центрування теодоліта одержуємо за формулою:

$$e_2 = \frac{e_1}{\sqrt{2}} = \frac{7,87}{\sqrt{2}} = 2,81 \text{ мм} \quad \text{Для } S_{\text{МІН}} = 565 \text{ м дістанемо } e_2 = 2,12 \text{ мм}.$$

Таку точність забезпечують оптичні центрири. Згідно із інструкцією центрувати прилади необхідно з точністю 1 мм.

Похибки приладу зменшуються завдяки раціональній методиці вимірювання кутів. Неперпендикулярність горизонтальної та вертикальної осей усувається при обчисленні середнього кута, виміряного з КЛ і КП. Однак нахил вертикальної осі через неточне горизонтування не компенсується вимірюванням кута з КЛ і КП. Допуск на приведення вертикальної осі у прямовисне положення визначається за формулою.

$$i_{\text{дон}} = \frac{m_{\beta_{\text{вип}}}}{2 \times \text{tg } \nu} = \frac{1,71''}{2 \times \text{tg } 20^\circ} = 1,89''.$$

Для кутових вимірювань у полігонометрії 4 класу, 1 і 2 розрядів використовують тахеометр Sokkia SET 610K зі збільшенням зорової труби $26\times$.

Згідно із цими даними похибку візування розрахую за формулою: $m_{\text{візв}} = \frac{60''}{\sqrt{x}}$. де $60''$ – критичний кут зору.

Похибка відлічування для тахеометра Sokkia SET 610K становить:

$$m_{\text{вдл}} = 2'' \quad m_{\text{вз}} = \frac{60''}{26} = 2,3'', \quad m_{\text{вдл}} = 2'' \quad n = \frac{2 \cdot 2,3^2 + 2^2}{2 \cdot 1,61^2} = 3 \text{ прийоми.}$$

Допуск Інструкції для полігонометрії 4 класу 6 прийомів.

Похибки зовнішнього середовища, а саме: горизонтальна рефракція, забрудненість атмосфери та коливання візирних марок, впливають на результати кутових вимірювань. Для їх зменшення вимірювання треба проводити за найсприятливіших умов. Похибки вихідних даних не впливають на вимірювання горизонтальних кутів, але впливають на нев'язку ходу, тому враховуються окремо при розрахунку точності.

2. СТВОРЕННЯ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ МЕТОДАМИ GNSS

2.1. Глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС)-основні засади

Супутникові пристрої стали невід'ємною частиною нашого життя. Вони використовуються для навігації суден, літаків та особистого орієнтування, хоча принципи їх роботи й складові відомі небагатьом.

Глобальна навігаційна супутникова система (ГНСС) об'єднує земні та космічні пристрої для визначення координат, часу, швидкості й напрямку руху. До складу Міжнародної служби GNSS (IGS), що працює під егідою Міжнародної геодезичної асоціації, входять близько 200 організацій, які збирають дані зі станцій GNSS у різних країнах.

Мережа GNSS складається з базових станцій, розташованих на відстані до 70 км одна від одної. Дані зі станцій надходять на сервер, де обчислюються RTK-поправки для мобільних приймачів. Приймач через GSM/GPRS отримує ці поправки, що мінімізує помилки вимірювань і забезпечує високу точність позиціонування.

Переваги GNSS: робота з одним приймачем без базової станції; висока точність навіть на великих відстанях; надійність і стабільна корекція при збоях.

GNSS охоплює глобальні й регіональні системи позиціонування, як-от GPS (США), ГЛОНАСС (Росія), Galileo (ЄС), BDS (Китай) і QZSS (Японія), які передають радіосигнали для визначення положення приймачів.

Геодезичні антени систем MGO забезпечують високоточне визначення даних PNT, мінімізують багатопроменеві сигнали й фіксують позиційні зміни з точністю до міліметра.

Станція MDO1, створена в 1993 році, є одним із перших сайтів глобальної мережі NASA. Вона підключена до п'яти GNSS-систем і передає дані до NASA CDDIS. Європейська мережа GNSS EUREF, яка включає понад 100 установ, підтримує систему координат ETRS89 для геолокації на європейському рівні.

EPN надає доступ до ETRS89, пропонуючи GNSS-дані, точні координати, швидкості та тропосферні параметри станцій для моніторингу тектонічних деформацій, клімату, погоди та рівня моря. GNSS включає космічні та наземні компоненти, де основний принцип — вимірювання відстані від антени до супутника для визначення точного місця об'єкта. В Україні з 2011 року працює мережа System.NET, що покращує точність і розширює зони позиціонування через GSM/GPRS або Інтернет. Вона усуває помилки, підтримує єдину систему координації, знижує витрати на обладнання та надає сервіси, як-от обробка даних RINEX.

Принципи роботи GNSS: • Орбітальна група — мережа навігаційних супутників. • Наземна система керування — контроль супутників і коригування орбіт. • Приймальне обладнання для визначення координат. • Система передачі поправок для підвищення точності.

GNSS працює шляхом вимірювання відстані між приймачем і супутниками з синхронізованими атомними годинниками, використовуючи геометричні розрахунки для визначення координат, швидкості, напрямку та пройденої відстані. Всі GNSS потребують сигналу від щонайменше 4 супутників для визначення координат, але відрізняються орбітами, кількістю супутників та орбітальними періодами, що впливають на точність.

ГЛОНАСС — російська система, розроблена для військових СРСР. Має 24 супутники на висоті 19 100 км з орбітальним періодом 11 годин. Точність — 3–6 м, з можливістю до 1 м. Ефективна на високих широтах.

Galileo — європейська система, яка працює з 2016 року. До 2025 року матиме 27 активних супутників на висоті 23 222 км. Точність — до 1 м, з додатковими функціями для рятувальних центрів.

Beidou — китайська система, глобальна з 2020 року, з 35 супутниками. Точність для цивільних — до 10 м.

GPS (NAVSTAR) (рис.2.1)— американська система з 32 супутниками на шести орбітах. Стандартна точність — 5–10 м, з додатковим обладнанням — до 10 см. Менш ефективна в приполярних регіонах.

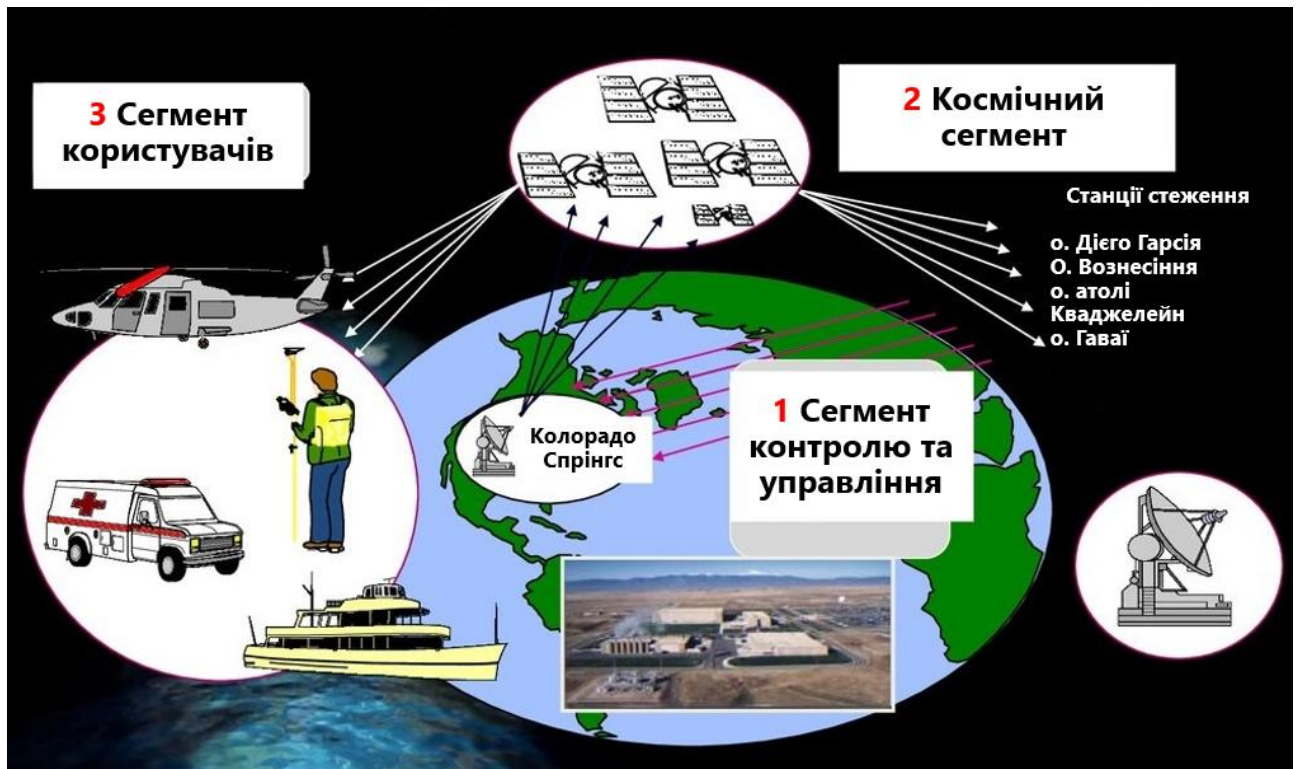


Рис. 2.1 GPS (NAVSTAR) [23]

Усі системи мають перешкоди сигналу (дерева, хмари, магнітні бурі), тому для точнішого прийому радять використовувати приймачі на відкритих місцевостях. Проблему скидання номера тижня в GPS можна вирішити оновленням ПЗ.

Технології A-GPS, RTK і LBS підвищують точність навігації. A-GPS швидко визначає місце через інтернет, LBS — за допомогою базових станцій, з кращою точністю в містах (до 50 м). RTK дає сантиметрову точність завдяки коригуванню від базових станцій, але залежить від умов прийому та відстані між пристроями (не більше 30 км).

GNSS відрізняється від традиційних систем, забезпечуючи глобальну навігацію на всіх етапах польоту, що дозволяє зменшити потребу в наземних і бортових системах. Впровадження GNSS зменшує витрати, дозволяє слідувати оптимальними траєкторіями та забезпечує точне наведення в віддалених районах. GNSS також підтримує посадку (APV), оптимізацію повітряного простору і наземні операції, але потребує міжнародної координації.

GNSS залежить від технологій SBAS і GBAS, однак сигнали чутливі до перешкод. Для забезпечення точності потрібно враховувати фізичні обмеження

аеродромів і мінімізувати вплив перешкод. Система оцінюється за точністю, цілісністю, безперервністю і доступністю, де доступність є ключовою. Точність GNSS змінюється через геометрію супутників і атмосферні умови, а цілісність визначає здатність своєчасно попереджати про ненадійність. Безперервність гарантує безперебійну роботу системи, а доступність залежить від супутникового покриття та наявності резервних систем.

Перед впровадженням нових навігаційних послуг необхідно оцінити системи за чотирма критеріями: точність, цілісність, безперервність і доступність. Операційні ризики, прогнозування доступності і рівень обслуговування є важливими для забезпечення надійності GNSS в авіації.

Цілісність системи включає своєчасне сповіщення екіпажу про збої, з можливістю використання альтернативних засобів навігації або зниження до певної висоти. Безперервність забезпечує стабільну роботу, що особливо важливо у зонах з високим авіатрафіком. Доступність оцінюється за часом, коли система забезпечує необхідну точність і надійність, а також ураховує альтернативи у разі збоїв. Прогнозування доступності допомагає визначити періоди, коли GNSS не підтримуватиме операцію, хоча ризик збоїв залишається.

ГНСС-мережа — це система супутникової навігації для визначення координат, напрямку та швидкості руху об'єктів. Близько 200 організацій, що збирають GNSS-дані з базових станцій по всьому світу, об'єднані в IGS (International GNSS Service), що є частиною Міжнародної асоціації геодезії.

GNSS-системи складаються з космічної та наземної частин і працюють на основі вимірювання відстаней до супутників для визначення місцезнаходження. Для покращення точності використовуються наземні радіомаяки і диференціальні поправки через геостационарні супутники або базові станції. Найвища точність досягається з RTK-поправками, які надходять із наземних станцій. В Україні з 2011 року працює система System.NET [9].

System.NET підвищує точність та розширює зону позиціонування через мобільні мережі або інтернет-з'єднання. Вона дозволяє усунути помилки вихідних пунктів, підтримувати міжнародну систему координат, знижує витрати

на обладнання та забезпечує доступ до додаткових сервісів, таких як постобробка даних RINEX і автоматична обробка.

До глобальних GNSS-мереж належать IGS і EPN. Мережа IGS включає станції, що контролюються різними організаціями для забезпечення високої точності позиціонування. Станції IGS підтримують Міжнародну земну референцну систему (ITRF). Загалом у мережі понад 800 станцій, серед яких 127 опорних, зокрема 8 українських, з яких 4 опорні: CRAO (Симеїз), GLSV (Київ), POLV (Полтава), UZHL (Ужгород).

Мережа IGS забезпечує безперервний доступ до GNSS-даних і продуктів, включаючи RINEX-файли, потоки в реальному часі та продукти, як-от орбіти супутників і координати станцій. Дані доступні через чотири світові центри: CDDIS, SOPAC, IGN, KASI, а також через регіональні центри, зокрема BKG для Європи. Дванадцять аналітичних центрів, таких як CODE, JPL і MIT, використовують ці дані для створення продуктів IGS, за допомогою програм Bernese GNSS Software, GIPSY/OASIS та GAMIT/GLOBK. Центри аналізу щодня визначають координати станцій та їхні швидкості для формування комбінованих продуктів, що реалізують ITRF. Національні геодезичні агенції оновили свої системи для сумісності з ITRF, зокрема ETRS89, NAD83 і GDA, що базуються на стандартних параметрах та трансформаційних формулах. Існують також відповідні інфраструктури для підтримки цих систем.

Продукти IGS підтримують наукові дослідження, зокрема моніторинг деформацій Землі, орбіти супутників, гідросферу, іоносферу та тропосферу. Операційні продукти включають точні супутникові ефемериди GNSS, позиції та швидкості станцій глобальної мережі GNSS, EOP (рух полюсів, тривалість дня) та рішення для годинників станцій і супутників. Інші продукти, як оцінки затримки в тропосфері та карти іоносфери, базуються на даних CDDIS GNSS. Точність орбіти оцінюється за трьома геоцентричними компонентами, з порівняннями лазерної локації. Продукти IGS Final надаються щотижня і є основою еталонної системи, а IGS Rapid – щодня з затримкою в 17 годин. Надшвидкісні продукти IGS зменшують затримку і покращують точність

прогнозів. Основні дані IGS включають вимірювання GPS і ГЛОНАСС у форматі RINEX та інші дані, зокрема ефемериди та метеорологічну інформацію. Продукти IGS доступні з різними затримками: надшвидкісні – майже в реальному часі, Rapid – через 1-2 дні, кінцеві – з найвищою точністю через 10 днів-4 тижні. IGS також надає дані калібрування антен і метадані станцій. Координаційний центр аналізу IGS (ACC) управляється Geoscience Australia та Масачусетським технологічним інститутом, що забезпечує високу доступність продукції.

EPN (European Permanent Network) – європейська GNSS-мережа, створена в 1995 році. Кількість станцій зросла, хоча деякі з них припинили роботу. Станом на 2018 рік мережа складала понад 300 станцій, класифікованих за якістю та тривалістю спостережень, зокрема на два класи: клас_A. Під час кампаній із згущення в Україні 7 станцій EPN мали категорію A і використовувалися в реалізації ETRF2000-UA. Станції класу B виконували роль звичайних GNSS-станцій. Станції ALCI 12371S001 та EVPA 12344M001 не працюють, а PRYL 15502M001, MARP 15556M001 та DNMU 12369M001 мають обмежену тривалість спостережень і не включені в загальноєвропейський аналіз. Реалізація системи ETRS89 підтримується EUREF через станції EPN, координати яких регулярно визначаються в ETRS89. В Україні ETRS89 реалізується через згущення системи EUREF за допомогою станцій EPN. Як і ITRS, ETRS89 розвивається поетапно, з кожною новою реалізацією вдосконаленою. Останньою реалізацією ITRS є ITRF2005 з епохою 2000.0, а для ETRS89 — ETRF2000 з епохою 2000.0.

Надійність координат мережі EPN залежить від тривалості спостережень та інших космічних методів. Координати EPN-станцій доступні в системах ITRS і ETRS89, і для станцій можна виділити три типи координат: (A) щотижневі координати, (B) мережеві координати і швидкості зміни, (B) офіційні координати та швидкості, що видаються IERS після комбінування багаторічних розв'язків. Координати типу (A) підходять для грубого контролю, (B) — для станцій з довгим терміном роботи, але без включення в IERS, а (B) є офіційними і

рекомендованими для використання в референційних системах. Якщо в радіусі 300 км є станції з офіційними координатами, їх слід використовувати для прив'язки; якщо ні — станції типу (Б). Координати типу (А) використовуються лише за відсутності інших типів. Вибір вихідних станцій має враховувати координати та швидкості для виявлення змін (наприклад, через розташування або заміну обладнання). Координати референційних станцій мають відповідати рекомендаціям EUREF і вимогам IGS, що забезпечує зв'язок координат із системою через EPN та реалізацією національної ETRS89.

Основні рекомендації: використовувати точне GNSS ПЗ, вибирати станції EPN, що охоплюють мережу з усіх боків, проводити спостереження не менше 3-4 тижнів, визначати зміни фазового центра антени. Оброблені дані трансформують у ITRF2005/ETRF2000 на епоху 2000.0, що забезпечує точність координат до 1 мм у плані та 3 мм у висоті. Мережа ZAKPOS складається з 5 станцій у Закарпатті: Рахів (RAKH), Міжгір'я (MIZG), Хуст (KHST), Мукачеве (МУКА), Великий Березний (VBER), схематично зображена на рис. 2.2.

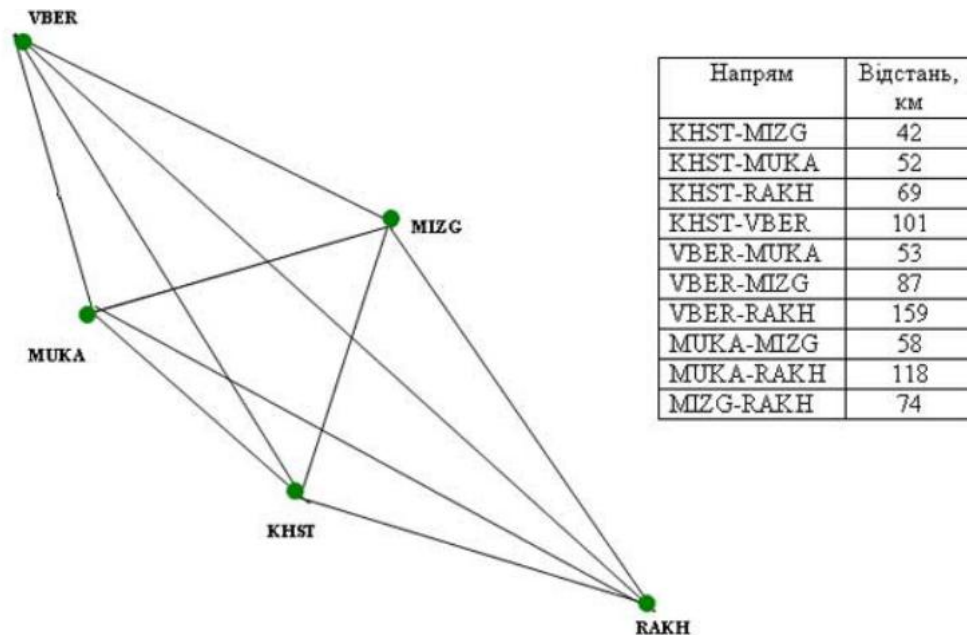


Рис 2.2 Схе́ма розташува́ння референці́чних ста́нцій мере́жі ZAKPOS

У таблиці наведені характеристики обладнання референційних станцій мережі ZAKPOS (типи приймачів та антен, висота антен).

Регулярні GNSS спостереження на станціях мережі ZAKPOS розпочалися 4 лютого 2009 року (35 GPS день, 1517 GPS-тиждень). Оброблено 10 тижнів

спостережень (від 1517 до 1526 GPS-тижня) з інтервалом 1-5 с. Використано дані станцій EPN UZHL (Ужгород) та SULP (Львів), де координати UZHL мають статус типу В, а SULP — типу Б.

Таблиця 2.1

Характеристики обладнання станцій мережі ZAKPOS

Код станції	MIZG	MUKA	KHST	RAKH	VBER
Тип приймача	TRIMBLE NetR5				
Тип антени	TRM55971.00				
Висота антени до ARP	0.0000 m	0.0770 m	0.0000 m	0.0000 m	0.0000 m

Обробка здійснена за допомогою Trimble Total Control 2.73 в режимі Double Difference, з урахуванням IERS та IGS конвенцій. Використовувалися калібрувальні моделі антен IGS, глобальні орбіти, лінійні комбінації фаз “ionosphere-free”, тропосферні корекції Dry Niell та іоносферні карти TEC. Координати UZHL застосовувались для регуляризованого розв’язку, а SULP — для контрольного оцінювання. В обробці брали участь 7 станцій, утворюючи близько 150 векторів. Спочатку мережу урівнювали як вільну, потім фіксували координати UZHL [5]

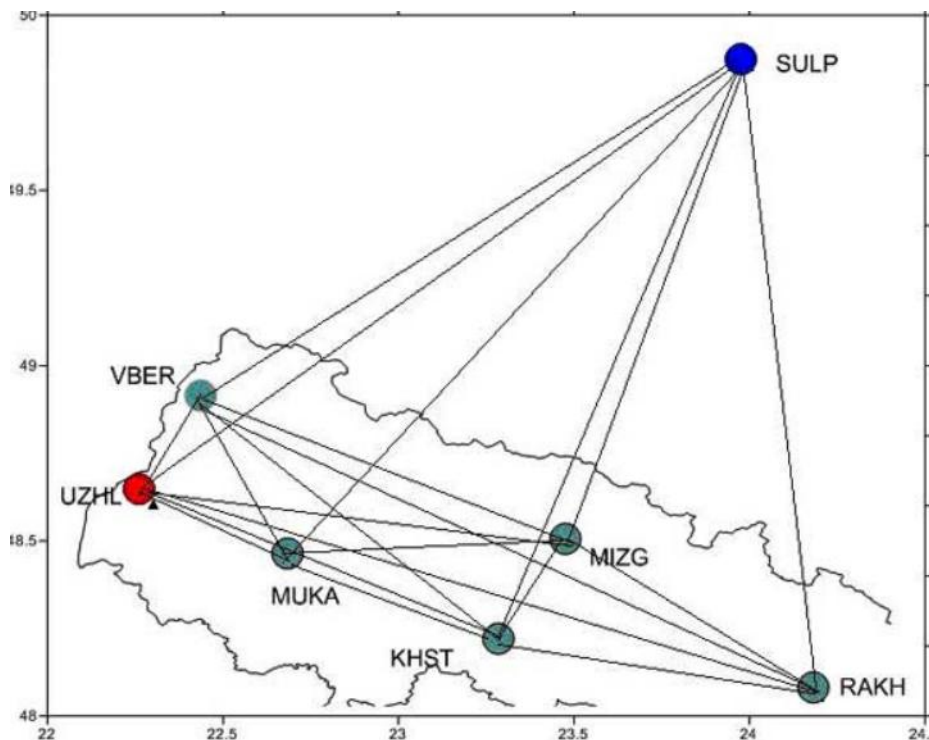


Рис. 2.3. Схема мережі референсних станцій ZAKPOS та станцій EPN.

У таблиці приведені статистичні характеристики точності обчислення координат станцій за весь період спостережень.

Таблиця 2.2

Точність обчислення координат станцій

Характеристика	Середнє			Max			Min		
	M_x, mm	1.3	1.2	1.4	2.0	2.1	2.7	0.7	0.7
M_y, mm	0.8	0.7	0.8	1.2	1.3	1.5	0.4	0.4	0.4
M_z, mm	1.4	1.3	1.6	2.1	2.3	3.0	0.7	0.7	0.9

Узагальнена точність координат референцих станцій мережі ZAKPOS. У таблиці подано порівняльні дані обчислених координат станції SULP із її координатами типу (Б) за проектом EPN „Time series monitoring“.

Таблиця 2.3

Узагальнена точність координат референцих станцій мережі ZAKPOS

Характеристика	Середнє		
Δ_x, mm	-5.6	-6.0	-3.5
Δ_y, mm	0.1	-0.1	0.8
Δ_z, mm	-11.4	-10.8	-7.7

Різниця між обчисленими та EPN координатами станції SULP. Характеристики точності координат референтних станцій ZAKPOS підтверджують їх високу якість і придатність для використання в RTK-режимі.

2.2. Основні засади та призначення міжнародних GNSS-мереж

GNSS можна впроваджувати поетапно, залежно від розвитку технологій та процедур. Впровадження залежить від таких чинників: наявність навігаційних служб, критерії проектування процедур GNSS, рівень обслуговування повітряного руху, аеродромна інфраструктура, оснащення ПС та нормативні акти. Враховуючи ці фактори, держави обирають різні стратегії впровадження, отримуючи різні переваги. Доповнюючі системи покращують обслуговування та знімають обмеження. Вибір між SBAS і GBAS залежить від повітряного трафіку

та структури простору, що потребує міжнародної співпраці для максимального ефекту.

У 1990-х авіаоператори почали використовувати GNSS завдяки доступним GPS-приймачам, які стали ефективним інструментом навігації. Однак через невідповідність супутникових угруповань вимогам ППП GNSS потребував підсилення сигналу. Система ABAS інтегрує GNSS з іншими датчиками літака для підвищення продуктивності, зокрема через RAIM, що виявляє помилки сигналу. RAIM потребує резервних супутників, тому навігація не завжди доступна на 100%, а вимоги до її доступності залежать від типу операції.

Багато держав використовують GPS/ABAS для покращення послуг без додаткових витрат на інфраструктуру, що є кроком до повного впровадження GNSS. Спочатку GNSS використовували для польотів на маршруті, в терміналі та для неточного заходу на посадку. Постачальники розробили автономні методи підходу GPS, які забезпечують точнішу інформацію та підвищують безпеку. У деяких країнах дозволено використовувати GPS для схем VOR, VOR/DME, NDB та NPA, що підвищує точність та обізнаність. Це проміжний етап до повного переходу на GNSS.

Однак не всі процедури VOR і NDB підходять для RNAV. Заходи з накладанням GPS мають бути виключені з AIP, якщо доступні автономні підходи GPS, адже вони надають кращу ефективність та безпеку.

Для впровадження процедур NPA на основі GPS потрібні експлуатаційні обмеження, які залежать від штату. Серед них: перебої GPS на великих територіях, наявність резервних NAVAID, щільність руху та резервування авіоніки. Загальною вимогою є заборона використання GPS для заходу на посадку на запасному аеродромі при визначенні мінімальних вимог погоди.

Деякі країни дозволяють GPS як єдину навігаційну систему в океанських і віддалених зонах за умови виявлення несправних супутників авіонікою (FDE). Літаки з подвійними системами виконують передполітні перевірки для забезпечення достатньої кількості супутників. Це економічна альтернатива інерціальним системам. Літаки з такими системами інтегрують GNSS з

інерціальними даними, що підвищує цілісність на всіх етапах польоту. Деякі країни використовують NOTAM для повідомлення про недоступність RAIM, тоді як багато операторів застосовують GPS для VFR, покращуючи безпеку та ефективність, хоча деякі вимагають IFR-сертифікації.

SBAS доповнює супутники, забезпечуючи коригування через геостаціонарні супутники. Система включає: а) наземні станції для моніторингу сигналів; б) станції для обробки даних і генерації повідомлень; в) передавачі для геостаціонарних супутників; г) транспондери для трансляції. SBAS забезпечує диференціальні поправки, сигнали додаткового визначення дальності та цілісність, покращуючи доступність у порівнянні з ABAS. У певних конфігураціях SBAS підтримує процедури APV (APV I і APV II), де APV II має кращу вертикальну продуктивність. Тільки один захід APV можливий до кінця смуги залежно від підтримки SBAS. Обидва типи однакові для авіоніки та процедур, але SBAS дозволяє нижчі мінімуми, покращуючи зручність і безпеку. Мінімальні значення APV вищі, ніж для категорії I, але не потребують додаткової наземної інфраструктури, що робить їх доступними для більшості аеропортів.

Рівні доступності SBAS дозволяють використовувати мінімум заходження на посадку для альтернативних аеропортів, підтримуючи RNAV-операції на маршруті та в терміналі. Це забезпечує ефективність повітряного простору, оптимальні маршрути для літаків і знижує витрати на традиційні NAVAID. Розробляються чотири системи SBAS: EGNOS, GAGAN, MSAS і WAAS. Зона покриття SBAS визначається геостаціонарними супутниками, а країни можуть створювати зони обслуговування для SBAS-операцій. Інші держави можуть використовувати ці зони через інтеграцію компонентів SBAS або дозвіл на використання сигналів, що підвищує продуктивність. Навіть з ABAS авіоніка SBAS забезпечує кращу доступність.

Архітектури SBAS відрізняються, але використовують однакові повідомлення на частоті GPS L1, що забезпечує сумісність для користувачів. Очікується розширення зон покриття та розробка нових мереж. Перекриття зон

покращує доступність через додавання джерел вимірювання дальності. Наземні системи GBAS надають точне заходження на посадку та підтримку RNAV у терміналах, транслюючи дані в діапазоні 108–117,975 МГц. GBAS зазвичай забезпечує коригування для кількох злітно-посадкових смуг одного аеропорту або найближчих об'єктів.

Інфраструктура GBAS включає електронне обладнання та антени для трансляції даних і прийому супутникових сигналів. Розташування антен залежить від місцевих умов, включаючи перешкоди, блокування сигналу та багатопроменевість. Антени для передачі в VHF-діапазоні мають забезпечувати покриття запланованих операцій. Складність і резервування станції GBAS залежать від послуг, а її вартість і гнучкість дозволяють оснащувати більше злітно-посадкових смуг точним електронним наведенням, підвищуючи безпеку та ефективність. Водночас смуги мають відповідати стандартам фізичної інфраструктури.

2.3. Аналіз ГНСС-мережі в Україні

У 2007–2008 роках Головна астрономічна обсерваторія НАНУ реалізувала проєкт «Інформаційно-вимірювальна GNSS-система та мережна VRS-технологія для геодезичних зйомок у кількох областях України». Створено прототип ГНСС-системи для геодезичних зйомок із регіональною мережею референтних станцій у Київській, Чернігівській та Черкаській областях. Для завершення розробки і введення в експлуатацію була необхідна модернізація станцій EVPA, CNIV та UZHL. Станція UZHL, що працює з 1999 року, була включена до Міжнародної ГНСС-служби та Європейської мережі. Однак застаріле обладнання фіксувало GPS-супутники лише на частоті L1. Модернізація мала забезпечити підтримку GPS і ГЛОНАСС [4].

Станція EVPA, також встановлена в 1999 році, передавала дані до міжнародних центрів, але з 2009 року обладнання застаріло, і реєстрація супутників обмежилась L1. Модернізація мала розширити її функціональність.

Станція CNIV, що працювала з 2005 року, також потребувала оновлення після п'яти років експлуатації.

Модернізація станцій включала: • безперебійну роботу за вимогами міжнародних служб; • оновлення приймачів для реєстрації GPS і ГЛОНАСС; • встановлення апаратури для диференціальних корекцій (RTCM 2.3/3.0); • додавання блоків для реєстрації GPS L2C і GPS L5; • підвищення точності генератора приймача до 20 нс.

Після модернізації точність визначення координат рухомого об'єкта досягла 2,5 см у режимі RTK та кількох дециметрів у режимі DGPS. Оновлене обладнання забезпечує реєстрацію GPS і ГЛОНАСС, зберігання даних на FTP-сервері та передавання інформації через Інтернет.

При створенні комплексу автоматизованої обробки ГНСС-спостережень (OCTAVA_PPA) враховано такі принципи: • підготовка даних для позиціонування, а не тільки оцінка якості; • виправлення аномалій замість їх видалення; • обробка одно- і двочастотних даних за подібними алгоритмами; • можливість роботи без диференціального підходу; • отримання якісних характеристик первинних спостережень. Для підвищення якості даних виконуються: • читання форматів GNSS (RINEX, IONEX, SP3 тощо); • перевірка цілісності даних; • корекція часу, виправлення аномалій і фазових стрибків; • оцінка шумів і багатопроменевих похибок.

На сьогодні функціонують дві глобальні навігаційні супутникові системи: GPS і ГЛОНАСС. Алгоритми для обробки двочастотних даних нових систем, таких як Galileo, BeiDou і QZSS, розроблено, але ще не впроваджено. Bernese підходить для різноманітних завдань: • обробка локальних і глобальних мереж за одно- і двочастотними спостереженнями; • автоматизована обробка GNSS-мереж; • робота з великим обсягом даних; • комбінована обробка спостережень різних GNSS; • моніторинг іоносфери та тропосфери; • визначення орбіт супутників GNSS та LEO.

Berner Software відповідає найвищим стандартам для геодезичних і GNSS-додатків. Bernese містить близько 100 програм, поділених на шість частин:

1. Трансферна: робота з форматами RINEX і Berner, обробка даних.
2. Конверсійна: перетворення файлів у формат ASCII, робота з файлами SINEX.
3. Орбітальна: обробка орбіт супутників і параметрів орієнтації Землі.
4. Обробна: програми для обробки спостережень та оцінки параметрів GPS/ГЛОНАСС.
5. Сервісна: моделювання спостережень, автоматизована обробка, перевірка координат.
6. Імітаційна: моделювання спостережень GPS/ГЛОНАСС.

Програми забезпечують високу точність: • підтримка одно- та двочастотних даних; • режими подвійного диференціалу та PPP; • оцінка різноманітних параметрів одночасно.

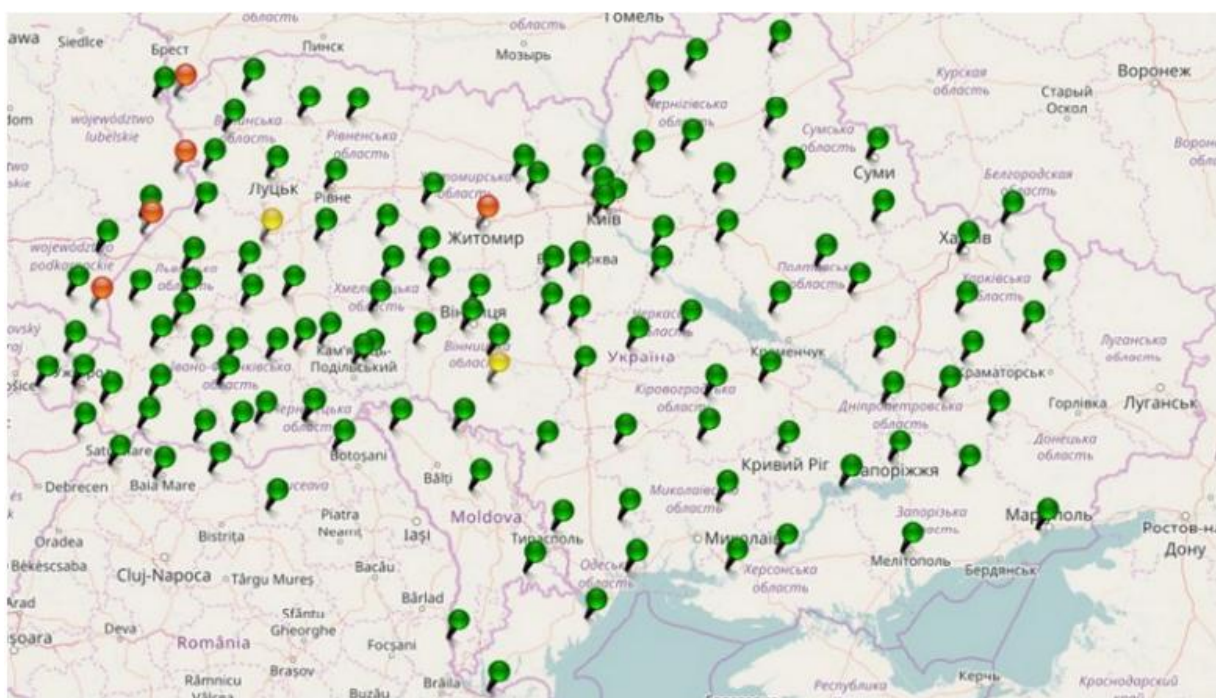


Рисунок.2.3.Мережа ZAKPOS станом на 2023 рік.

Національна GNSS-мережа України складається з кількох приватних мереж, зокрема ZAKPOS, TNT-ТPI та інших. ZAKPOS, перша регіональна мережа в Україні, почала роботу 4 лютого 2009 року в Закарпатті відповідно до стандартів EUPOS.

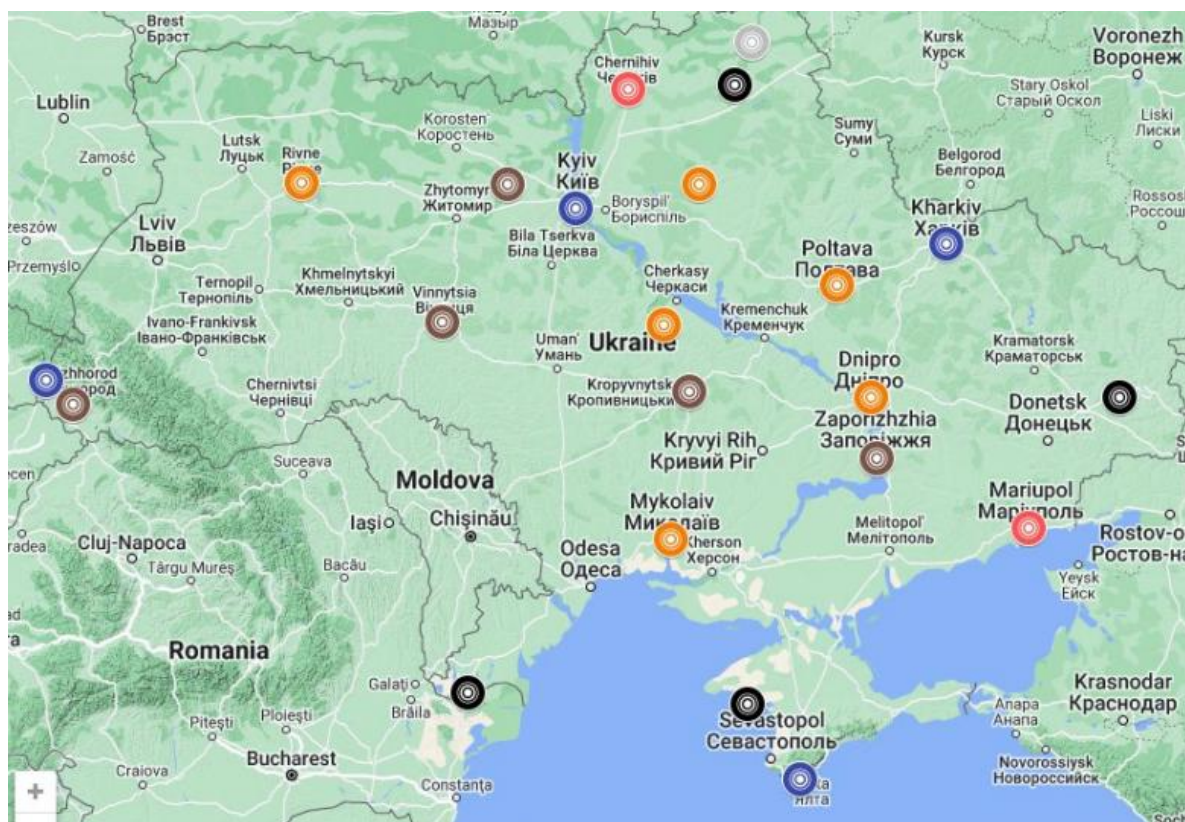


Рисунок 2.4. Мережа ГНСС-станцій станом на 2023 рік [6].

Українська постійна ГНСС-мережа на 2022 рік включає станції державних, міжнародних і комерційних мереж. Це ГНСС-станції ГАО НАН України, станції System.NET, дані яких передаються до EPN, а також станції УПМ ГНСС, що надсилають спостереження до IGS та EPN. Мережу доповнюють станції Системи координатно-часового і навігаційного забезпечення України, які передають дані до EPN, а також демонтовані або зупинені станції.

Одним із завдань дослідження є розробка комбінованого рішення для національної системи відліку. Виділяють міжнародні (ITRS, WGS-84, PZ-90), континентальні (NAD83, ETRS) і національні системи. WGS-84, розроблена США, використовує глобальний еліпсоїд і моделі для навігації. PZ-90, створена РФ, містить параметри для взаємодії з іншими системами. Точність взаємного розташування точок до 30 см на відстанях до 10 000 км.

ITRS, розроблена IERS в 1991 році, враховує рух Землі і змінює координати тільки через геофізичні процеси. ETRS89 прив'язана до Євразійської плити, від ITRS розходиться на 2,5 см на рік. Реалізація ITRS відбувається через

бази ITRF, які оновлюються через GNSS, VLBI, SLR і DORIS. Остання версія — ITRF2014.

IGS збирає і поширює дані для наукових і інженерних задач, таких як дослідження деформацій і моніторинг іоносфери. Дані IGS використовуються для консолідації ITRF через мережеві рішення в форматі SINEX.

Технологія обробки GNSS-даних спостережень в Україні і сусідніх країнах описує створення каталогу координат:

1. Узагальнено характеристики діючих мереж станцій України.
2. Описано метод обробки даних для понад 100 станцій, з поділом на блоки мережі IGS/EPN.
3. Створено каталог координат станцій України в системах ETRF2000 та USK-2000, з точністю понад 99% не більше 1 см.
4. Опорні станції використовуються для оновлення карт, кадастру та інших геодезичних робіт. Очікуються зміни у вимогах до GNSS, оскільки майбутні системи будуть мультимодальними і потребуватимуть координації між користувачами.

2.4 Згущення геодезичної мережі з використанням електронних тахеометрів

Під час прокладання полігонометричних ходів, зазвичай, застосовують триштативну систему (рис.2.5). Для візирних цілей використовують візирні марки (відбивачі), які можуть установлюватися у ті ж підставки що і кутомірний прилад.

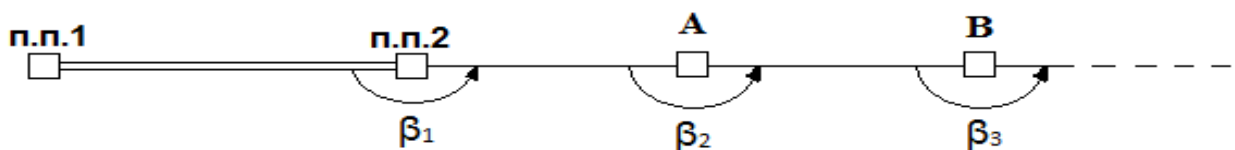


Рис.2.5. Триштативна система вимірювання кутів.

Прилад та підставки для кутомірних марок закріплюють на штативах, та центрують над пунктами. Аналогічно, як прилад, центрують марки. Точність центрування приладу та візирних пристосувань у полігонометрії 1 та 2 розрядів – 1мм.

Тахеометр встановлюють, наприклад, на штативі (пункт п.п.2), а на задньому (пункт п.п.1) та передньому (пункт А) штативах встановлюють відбивачі з підставками. Вимірюють горизонтальний кут β_1 .

По завершенні вимірювань тахеометр, та обидва відбивачі виймають із підставок. Тоді на пункті п.п.2 замість тахеометра установлюємо, у вже зцентровану підставку, відбивач; на пункті А установлюємо, у вже зцентровану підставку, тахеометр; штатив з підставкою знімаємо з пункту п.п.1 та центруємо її в пункті В.

Виконуємо вимірювання горизонтального кута β_2 на пункті А.

Далі аналогічно переходимо на пункт В і т.д. Вимірювання кутів виконують в сприятливих умовах для спокійних зображень або коли дрижання візирних цілей незначні.

В полігонометрії мереж згущення 4 класу та 1, 2 розрядів горизонтальні кути вимірюють двома способами: способом кругових прийомів та способом окремого кута.

В табл. 2.4 подана кількість прийомів вимірювань кутів, залежно від класу чи розряду полігонометрії та точності приладу.

Таблиця 2.4.

Вимоги щодо вимірювання кутів

Прилади з точністю вимірювання кутів одним прийомом	Кількість прийомів		
	4 клас	1 розряд	2 розряд
2"	6	2	2
5"	-	3	2

Для виконання вимірювання кутів у полігонометрії 4 класу використовувався електронний тахеометр Sokkia SET 610.

В таблиці 2.5. подані характеристики тахеометра Sokkia SET 610 [19].

Таблиця 2.5

Електронний тахеометр Sokkia SET 610 основні характеристики

	Технічні характеристики	Величини
Вимірювання кутів	Одиниці вимірювання	Градус / Гон / Проміле
	Дискретність кутових одиниць	1" / 0,3 мГон / 0,005 Проміле 5" / 1.5 мГон / 0,024 Проміле
	Точність вимірювання	6" / 1.9 мГон / 0,030 Проміле
	Час відображення відліку, с	0,5
Режим вимірювань кутів	Зростання відліків горизонтального круга	За ходом год. стрілки / Проти ходу год. стрілки.
	Вертикальний	Зенітна відстань 0°-360° / Кут нахилу ±0°-90°; 0°-360°; Проміле ±0-1 000‰
	Діапазон компенсації, кут. Мін	3
Вимірювання віддалей Діапазон вимірювань	На стандартну призму AP01:	1-2400
	На три стандартних призми AP01:	1-3100
	У режимі слідкування, мм	10
	Макс. віддаль на дисплеї, м	4199,999
	Одиниці вимірювань	Метри / Фути / Дюйми
Точність вимірювань, мм	У режимі точні вимірювання	2+2 D (мм) 10 ⁻⁶
	У режимі швидкі вимірювання	5+5 D (мм) 10 ⁻⁶
Режим вимірювань	Точні вимірювання	одноразові-багаторазові
	Швидкі вимірювання	одноразові-багаторазові
	Слідкування	одноразові
Час вимірювань, с	Точні вимірювання	2,8 + кожні наступні 1,6
	Швидкі вимірювання	2,3 + кожні наступні 0,8
	Слідкування	1,8 + кожні наступні 0,3
Атмосферна поправка Діапазон введення	Введення температури, °С	-30 до +60 з кроком 1
	Тиску, гПа	500 до 1400 з кроком 1
	Тиску, мм рт. ст.	375 до 1050 з кроком 1
	Атмосферної поправки	-499 до 499 з кроком 1
	Приладової поправки, мм	-99 до 99 з кроком 1
	Поправка за кривину Землі і рефракцію	Не вводиться / Вводиться з k = 0,142 або 0,20
Ціна поділки рівня на 2 мм	Циліндричного, кутових сек.	40
	Сферичного, кутових мін.	10
Пам'ять	Внутрішня пам'ять, точок	10 000
Оптичний центрир	Зображення, Збільшення, разів	земне, 3
	Мінімальна віддаль фокусування, м	0,3

Перед початком знімання необхідно налаштувати тахеометр: встановити одиниці вимірювань, умови та режим спостережень, код і напрямок відлічування горизонтального круга, а також зорієнтувати прилад.

Вертикальну вісь можна встановити за допомогою рівня на підставці або бочкоподібного рівня. Точне налаштування вертикальної осі здійснюється за допомогою електронного рівня, вмикаючи прилад, вибираючи функцію НАКЛ, і коригуючи бульбашку за допомогою підймальних гвинтів.

Далі вибирається файл роботи через функцію ПАМ, де на дисплеї відображаються доступні файли. Підтвердження вибору здійснюється клавішею введення. Якщо необхідно, можна вибрати файл координат. Після цього переходимо до сторінки вимірювань і вибираємо функцію ЗАП для зняття даних.

На сторінці даних станції відображаються координати точки. Значення координат можна задати вручну або вибрати з пам'яті приладу через функцію РЕДКТ або СЧИТ. Якщо точок немає, прилад покаже повідомлення "Немає даних".

Для орієнтування візують на точку і вводять дирекційний кут ($0^{\circ}00'00''$ для орієнтування). Після вимірювання на задній станції, здійснюють візування на передню точку та запис даних. Повторюють процес для кожної наступної станції.

Після завершення польових робіт проводиться камеральна обробка вимірювань за допомогою комп'ютерних технологій.

Переписування даних з електронного тахеометра Sokkia SET 610 на ПК: Запускаємо програму Редактор вимірювань, вибираємо її та налаштовуємо порт для підключення USB.

Для цього в меню Інструмент вибираємо Зв'язок з приладом. Якщо за замовчуванням вибраний COM 1, змінюємо на відповідний порт. Натискаємо ОК. У вікні налаштувань вибираємо профіль Sokkia SDR33/31, встановлюємо порт і швидкість 9600, переконуючись, що параметри зв'язку збігаються з налаштуваннями тахеометра [19].

Натискаємо ОК, після чого відкривається вікно передачі даних.

Задаємо шлях для збереження файлу та його назву, натискаємо Зберегти. Включаємо тахеометр і через ESC переходимо до налаштувань. У функції ПАМ вибираємо Параметри зв'язку та встановлюємо параметри, як у програмі. Повертаємось у меню і вибираємо Експорт даних. Виділяємо файл для передачі, натискаємо Enter, потім підтверджуємо функцію ТАК. Після цього починається передача даних, яка відображається у програмі.

Після завершення закриваємо вікно, підтверджуємо завантаження даних в Редактор вимірювань, де з'являються результати.

Закриваємо програми, вимикаємо прилад та від'єднуємо кабель.

3. ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ПОЛОЖЕННЯ ПУНКТИВ В МЕРЕЖАХ, СТВОРЕНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ ГНСС

3.1. Залежність точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень та відстані між одночасно працюючими приймачами

Оптимальну тривалість відносних статичних ГНСС-спостережень досліджують вже тривалий час, оскільки це важливо для геодезії. ГНСС-технології широко застосовуються для вирішення різноманітних задач із різними вимогами до точності координат пунктів та віддалей між приймачами. Встановлено, що збільшення тривалості сеансу підвищує точність параметрів векторів і взаємного положення пунктів, якщо мінімізовано вплив інших джерел помилок. Хоча довші сеанси дають більше надлишкових вимірів, значні похибки можуть негативно впливати на результати. Точність визначення векторів регламентується інструкціями, залежно від віддалей між приймачами та тривалості спостережень. Проте в технічних характеристиках приймачів детальні вказівки щодо тривалості відсутні, що ускладнює проектування спостережень у мережах із різною довжиною векторів.

Мета наших досліджень — встановити залежність точності довжин векторів від тривалості спостережень та віддалей між приймачами для оптимізації проектування ГНСС-мереж. Через відсутність доступу до еталонних полігонів ми використали дані перманентних станцій GPS у штаті Каліфорнія (США). Вимірювання виконувались двочастотними приймачами з інтервалом 30 секунд, аналізувалися довжини векторів 5–20 км, які відповідають державним мережам 2 класу. Для аналізу взято дані 34 векторів із спостережень 21–22 жовтня 2018 року на 14 станціях. Схеми створених мереж наведені на рис. 3.1. Обчислені відстані між перманентними станціями за геоцентричними координатами, отриманими з [25] та визначеними на основі тривалих спостережень (табл. 3.1), використано в дослідженні як еталон для порівняння з відстанями, обчисленими за результатами спостережень.

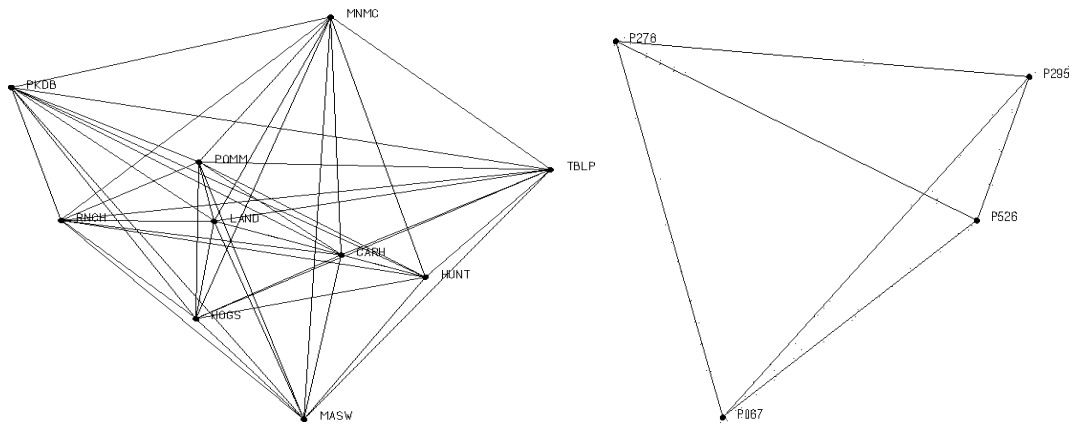


Рис. 3.1. Схеми мереж

Таблиця 3.1

Координати перманентних станцій

ID станції	Назва станції	Координати, м			Тип антени	Місце розташування
		X, м	Y, м	Z, м		
HUNT	HUNT_SCGN_CN2001	- 2625065,1905	- 4460125,5776	3716663,8938	701945B_M w/SCIT Dome	Parkfield / California
HOGS	HOGS_SCGN_CN2001	- 2618467,5708	- 4462644,7786	3717747,7730	701945B_M w/SCIS Dome	Parkfield / California
LAND	LAND_SCGN_CN2001	- 2623331,5878	- 4463671,3690	3713566,3561	701945B_M w/SCIS Dome	Parkfield / California
MASW	MASW_SCGN_CN2001	- 2614188,1591	- 4462851,5262	3721323,9442	701945B_M w/SCIT Dome	Parkfield / California
CARH	CARH_SCGN_CN2001	- 2620445,4322	- 4460941,5578	3718446,6466	701945B_M w/SCIT Dome	Parkfield / California
P067	CleggRanchC S2004	-2618260,9875	-4456647,2905	3726074,3752	Choke Ring w/SCIT Dome	Cambria / California
MNMC	MNMC_SCGN_CN2001	- 2623410,7214	- 4458420,3417	3719523,7963	Choke Ring w/SCIT Dome	Parkfield / California
P295	ChimneyRR_CS2004	-2675257,4761	-4441701,2637	3702496,5269	Choke Ring w/SCIT Dome	Lake Nacimiento / California
P278	ClarkeMtn_C S2004	-2675936,1194	-4452984,6967	3687903,2060	Choke Ring w/SCIT Dome	San Simeon / California
PKDB	Parkfield - BARD Station	-2658829,0154	-4452735,2902	3701287,9384	700936 D/M Choke w/SCIS Dome	Parkfield / California
P526	RamageRnch CS2004	-2662913,4036	-4454742,3910	3695682,5058	Choke Ring w/SCIT Dome	Templeton / California
RNCH	RNCH_SCGN_CN2001	-2623159,1067	-4457075,8330	3721348,8963	701945B_M w/SCIT Dome	Parkfield / California
POMM	POMM_SCGN_CN1993	-2627226,7982	-4452757,6201	3723620,3970	701945B_M w/SCIS Dome	Parkfield / California
TBLP	TBLP_SCGN_CN2001	-2627524,8378	-4456235,7352	3719700,5762	701945B_M w/SCIT Dome	Parkfield / California

Програмне забезпечення Trimble Geomatic Office дає змогу поділяти результати добових спостережень на сеанси різної тривалості та опрацьовувати їх окремо [26]. Для кожного вибраного вектора створено чотири сеанси по 12 годин, вісім – по 6 годин, 16 – по 3 години, 24 – по 2 години та 48 – по 1 годині.

Усі сеанси опрацьовано, і визначено параметри векторів. Отримані значення порівнювали з довжинами векторів, розрахованими за координатами з табл. 3.1, які мають значно вищу точність. Різниця довжин вважалась істинними похибками, що дозволило визначити середні квадратичні помилки векторів. Результати подано у вигляді діаграми на рис. 3.2.

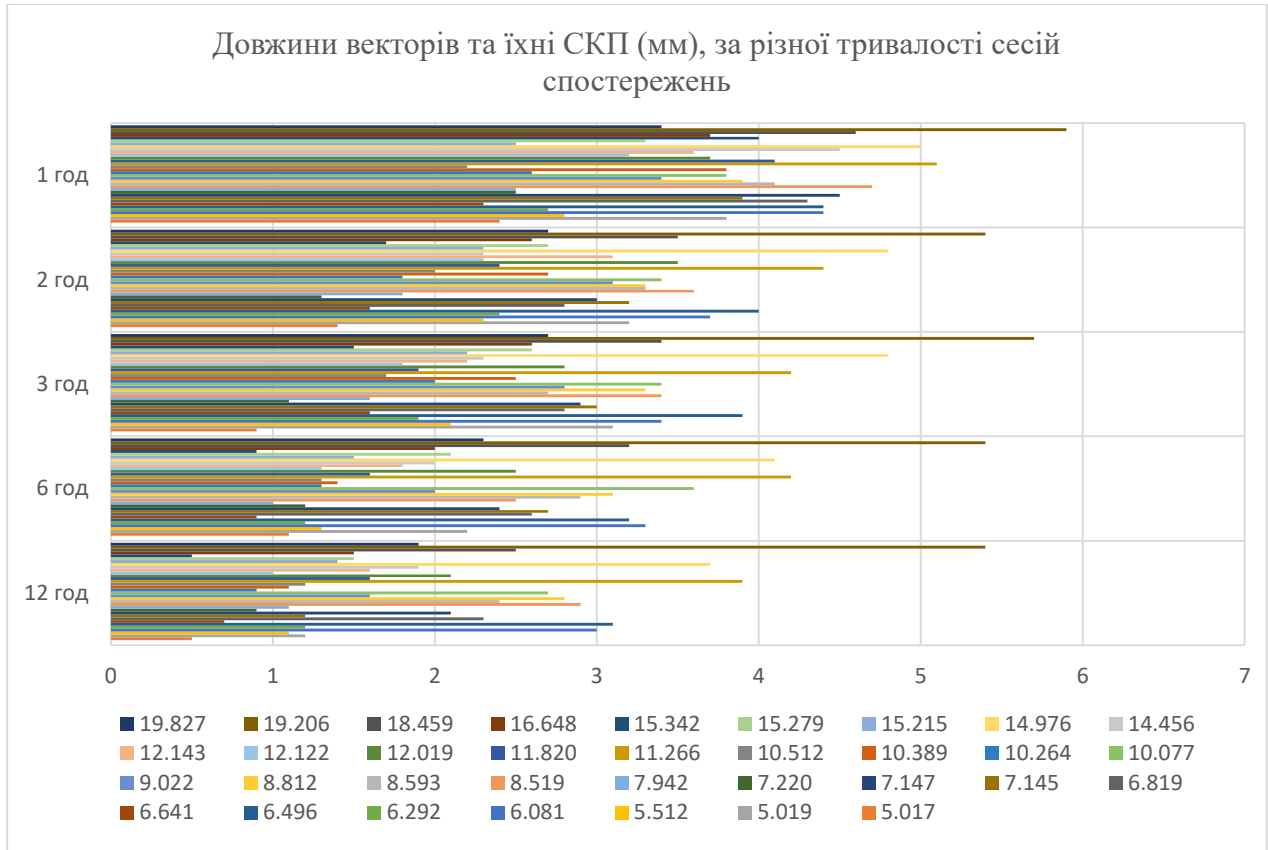


Рис. 3.2. Довжини векторів і їхні СКП (мм) за різної тривалості спостережень.

Проведено кореляційний аналіз залежності СКП довжини вектора (M) від його довжини (S) і тривалості спостережень (T) (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Статистичні параметри СКП, довжин векторів і часу сесій.

Показник	S	M	T
Стандарт	4,1680	1,1650	3,9699
Сума всіх значень параметра	362	454,7	24
Кількість, n	34	170	5
Середнє	10,6764	2,6747	4,8
Середнє значення квадрата параметра	131,3575	8,5112	38,8
Сума квадратів усіх значень параметра	4466,1567	1446,91	194

Результати обчислень коваріацій і коефіцієнтів кореляції між СКП довжин векторів, їхньою довжиною та тривалістю сеансів дозволили скласти рівняння регресії на основі отриманих даних:

$$M \times S \times T = 0,069 \times S - 0,134 \times T + 2,6 .$$

де S — довжина вектора (км), T — тривалість сеансу (год), $M \times S$ — СКП довжини вектора залежно від відстані між приймачами (мм), $M \times T$ — СКП довжини вектора залежно від тривалості спостережень (мм).

Формула дозволяє приблизно визначити точність визначення векторів довжиною від 5 до 20 км при тривалості спостережень від 1 до 12 годин. У дослідженні не враховано, що в кореляційному аналізі використовуються середні квадратичні помилки довжин векторів, обчислені на основі різної кількості сеансів, тобто з нерівноточними величинами. Крім того, використано обмежену кількість даних: 34 вектори з довжинами від 5 до 20 км, визначені за два дні спостережень. З огляду на це, а також на необхідність вирішення додаткових питань, дослідження продовжать, удосконаливши методику та розширивши використані дані.

Для уточнення формул середніх квадратичних помилок довжин векторів і визначення залежності точності від довжин векторів і тривалості сеансів спостережень, використано результати спостережень з 20 діб, отримані з 16 перманентних станцій у штаті Вашингтон (США). Проведено аналіз даних для мінімізації впливу факторів, що погіршують вимірювання, зокрема ідентифікацію вимірів з похибками, що перевищують загальний вплив похибок. У нашому випадку за 20 діб одночасно спостерігається не менше п'яти супутників. Аналіз RINEX-файлів був виконаний за допомогою програмного забезпечення Rinex Viewer.

Було проведено аналіз геометрії розташування супутників за допомогою програми Planning з використанням навігаційного ефемеридного файлу YUMA та визначено параметр GDOP, що впливає на точність спостережень. У більшості випадків його значення не перевищувало три, і лише декілька разів, зазвичай вночі, воно зростало до шести. Це свідчить про сприятливу геометрію супутників

під час спостережень, що забезпечує стабільну точність. Зазначимо, що сьогодні доступне планування ГНСС-спостережень он-лайн, де можна переглянути потрібну інформацію для вимірювань, таку як кількість супутників, їх висоту, траєкторії руху та параметри DOP. Результати аналізу геометрії, виконаного за допомогою програми Planning, були підтверджені. З обраних спостережень на 16 перманентних станціях було сформовано мережу з 120 векторів довжиною від 1 до 25 км.

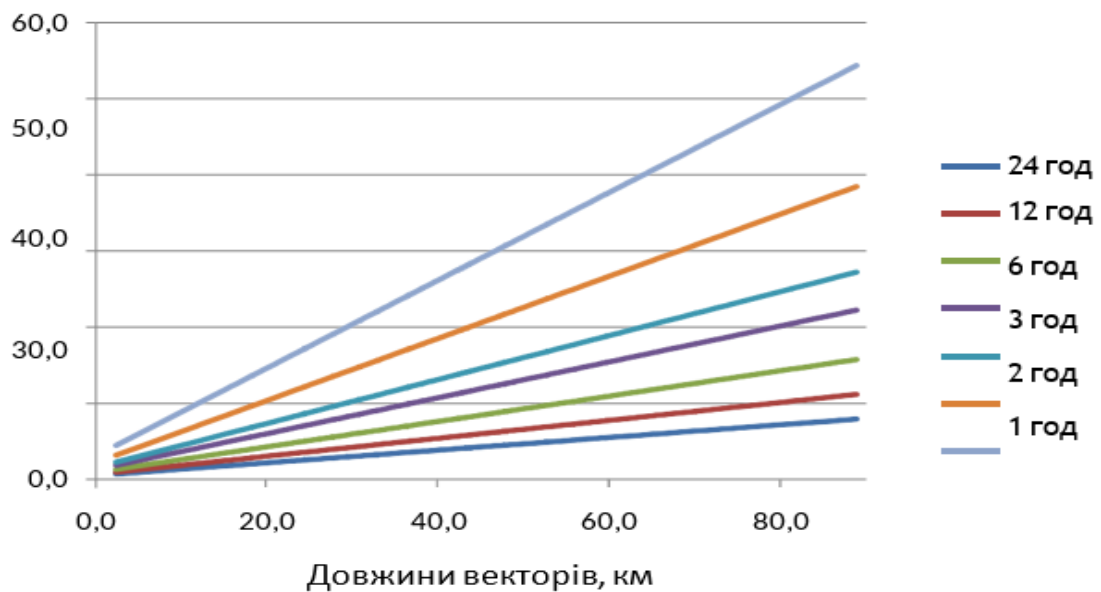


Рис. 3.3. Значення середніх квадратичних помилок довжин векторів.

Чітко спостерігається залежність точності визначення довжин векторів двочастотними приймачами від тривалості спостережень: зі зменшенням тривалості сеансу точність знижується. Для одночастотних приймачів така залежність не виявляється. Аналізуючи різниці між СКП, визначеними двочастотними приймачами та за формулами, встановлено, що найбільші розходження спостерігаються для довгих векторів при коротких сеансах, а найменші – для коротких векторів і довгих сеансів.

Однак така тенденція не спостерігається у формулі Різниць СКП. Різниці в довжинах векторів при різній тривалості сеансів є майже однаковими для коротких відстаней, але зі збільшенням довжин векторів розходження між обчисленими та спостереженими значеннями зростають. Однією з причин цих розбіжностей є те, що рівняння виведені з даних, що датуються понад 8 років

тому. Важливо також, що ці результати стосуються лише GPS, оскільки на той час ГЛОНАСС був на низькому рівні розвитку, що також пояснює більші розбіжності для мережі №2.

Апробація математичних залежностей точності визначення довжин векторів вказує на актуальність питання тривалості сеансів при побудові геодезичних мереж. Одним із недоліків є обмеження використання формул для певного діапазону довжин векторів, для яких вони були виведені. Результати здебільшого підтверджують залежність точності від тривалості спостережень, але точність для різних довжин векторів залишається невизначеною. Також нез'ясованою залишається точність вимірювань одночастотними приймачами, хоча на пунктах ДГМ здебільшого використовуються двочастотні приймачі, що дають можливість коригувати іоносферні помилки за допомогою лінійних комбінацій вимірювань на різних частотах. Проте, для дуже коротких відстаней двочастотні приймачі не завжди доцільні, оскільки лінійні комбінації можуть збільшувати шумові помилки, що впливає на точність визначення координат. Тому програмне забезпечення для GPS і GPS+ГЛОНАСС за замовчуванням не використовує "iono-free" комбінації для векторів до 5 км.

При більших відстанях між приймачами кореляція іоносферних помилок знижується, що дозволяє досягти більш точної та надійної оцінки координат при використанні двочастотних приймачів для відстаней до 100 км і більше. Вимірювання на двох частотах також дозволяє швидше і точніше вирішувати фазову неоднозначність, що є важливим для досягнення геодезичної точності. У одночастотних приймачах цей процес займає більше часу і залежить від довжини бази. Двочастотні приймачі використовують різні комбінації вимірів для миттєвого визначення векторів і координат, що забезпечує більшу точність, хоча ці приймачі дорожчі за одночастотні.

З появою нових геодезичних технологій, що відповідають вимогам точності та доступності, виникла потреба в розробці методів оптимального проектування геодезичних мереж, удосконаленні методів спостережень та їх планування. Кореляційний аналіз для визначення зв'язку між СКП довжин

векторів (M), їх довжинами (S) та тривалістю сеансів (T) не дав оптимальних результатів. Побудовані графіки показали лінійну залежність СКП від відстані між приймачами і нелінійну від тривалості спостережень. За даними [129], найкраще зв'язок між СКП і тривалістю сеансу описує експоненціальна крива, але в нашому випадку вона не відображала точного зв'язку. Тому було вирішено виконати двофакторний кореляційний аналіз між СКП довжин векторів, відстанню між приймачами та коренем квадратним тривалості спостережень. Однак при тривалості 0,5 годин розходження між значеннями СКП були значними. Тому проведено аналіз між СКП і відстанню між приймачами та натуральним логарифмом тривалості сеансів. Побудовані графіки показали лінійну залежність точності від тривалості спостережень, підтверджуючи зв'язок з натуральним логарифмом. Для прикладу на рис. 3.4 наведено графік для вектора 15,026 км, визначеного за результатами спостережень двочастотними та одночастотними GPS-приймачами.

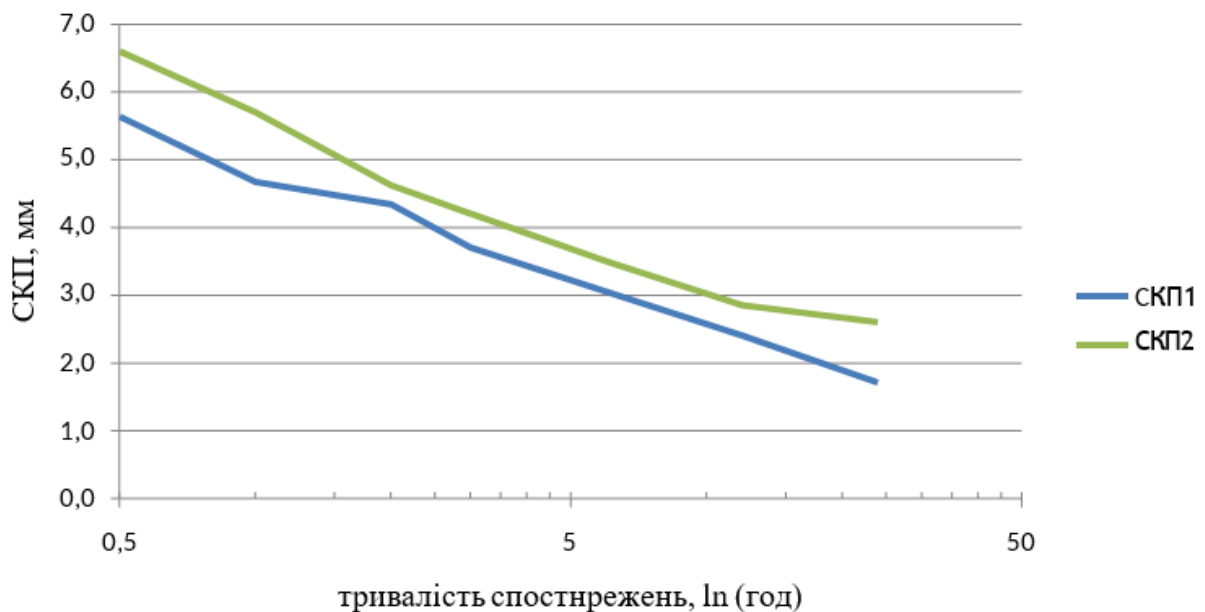


Рис. 3.4. СКП1 – середні квадратичні помилки довжин векторів визначені за результатами спостережень двочастотними приймачами, тоді як СКП 2 – одночастотними.

Для визначення залежності між СКП довжини вектора (M), його довжиною (S) і тривалістю спостережень (T) було проведено кореляційний аналіз, етапи якого описано нижче. Результати наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Статистичні параметри СКП, довжин векторів та тривалості сесій

Двочастотні приймачі			
Показник $M S T$	M	S	$Ln(T)$
Кількість, n	840	120	7
Сума всіх значень параметра	2474,1526	1103,5565	8,5533
Середнє	2,9454	9,1963	1,2219
Стандарт	1,2802	6,0032	1,2650
Середнє значення квадрата параметра	10,3145	120,6107	3,0933
Сума квадратів всіх значень параметра	8664,1943	14473,2890	21,6530
Одночастотні приймачі			
Кількість, n	840	120	7
Сума всіх значень параметра	3087,0469	1103,5565	8,5533
Середнє	3,6751	9,1963	1,2219
Стандарт	1,4054	6,0032	1,2650
Середнє значення квадрата параметра	15,4811	120,6107	3,0933
Сума квадратів всіх значень параметра	13004,1131	14473,2890	21,6530

За результатами обчислень коваріацій та коефіцієнтів кореляцій між середніми квадратичними помилками довжин векторів та відстанями між приймачами і СКП довжин векторів та тривалістю сеансу для векторів від 1 до 25 км. Дослідження проводилося для визначення залежності СКП довжин векторів від відстані між приймачами та тривалості сеансів. побудована поверхня похибок вимірів для односистемних двочастотних і одночастотних приймачів (рис. 3.5). Представлені Як видно, підтверджуються висновки про залежність точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень та довжин векторів.

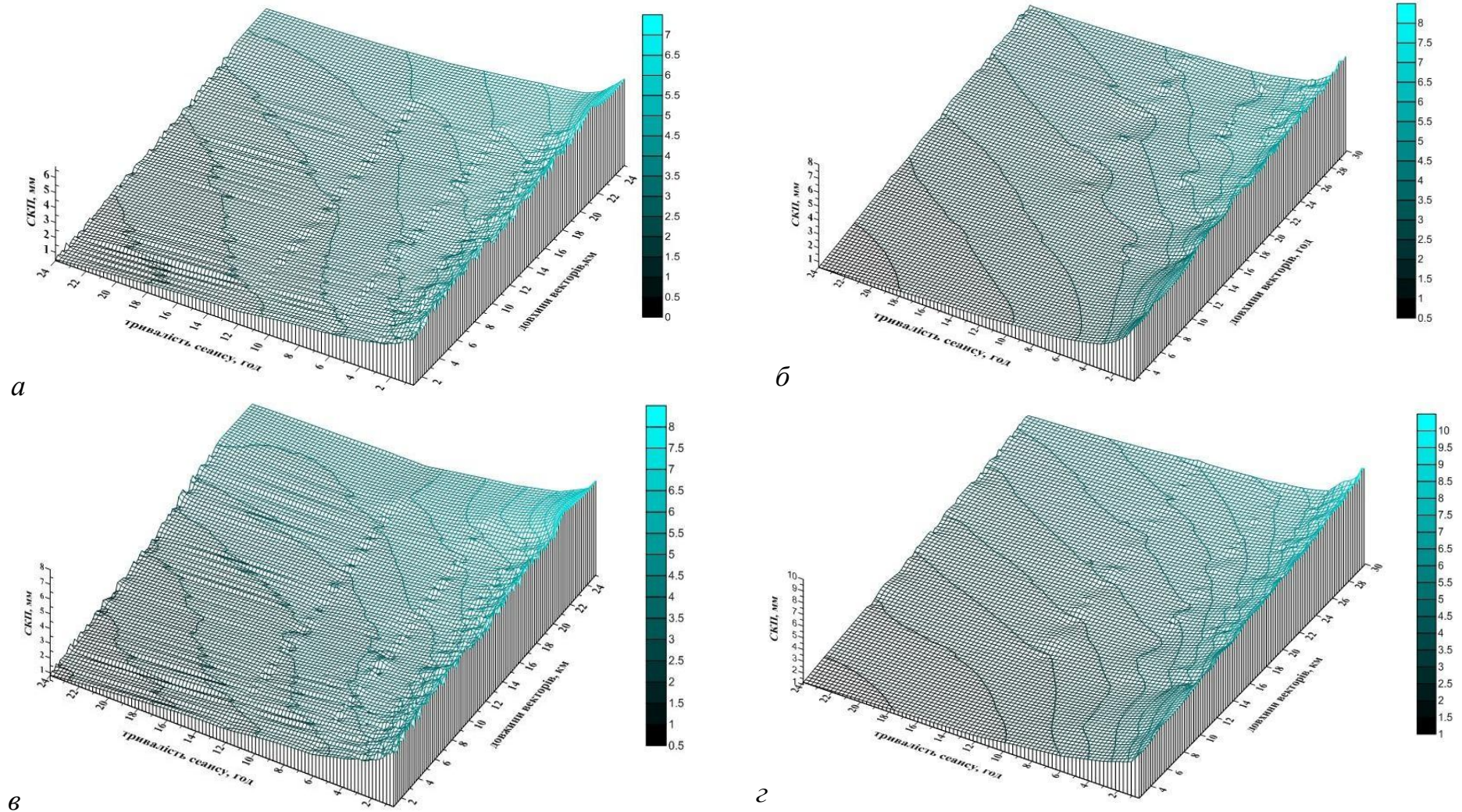


Рис. 3.5. 3D – поверхня залежності СКП довжин векторів від довжин векторів (від 1 до 25 км) та тривалості сеансу (від 0,5 до 24 год) для двочастотних (а) та одностототних (б) приймачів та для двосистемних двочастотних (в) та двосистемних одностототних приймачів (г)

Попередні дослідження базувалися на GPS-спостереженнях, проте важливо оцінити, як змінюється точність визначення довжин векторів залежно від тривалості спостережень і довжини векторів при використанні GPS та ГЛОНАСС. Для цього було проаналізовано дані мережі №2.

На основі середніх квадратичних помилок (СКП) довжин векторів побудовано залежності СКП від тривалості спостережень (24, 12, 6, 3, 2, 1, 0,5 год) та довжин векторів для двосистемних дво- і одночастотних приймачів (рис. 3.5). Для одночастотних приймачів розглядали вектори довжиною 2,6–30 км, а для двочастотних — 2,6–88,9 км та 2,6–30 км, щоб порівняти результати. Отже, СКП для двочастотних приймачів розраховано на вектори 3–89 км, а для одночастотних — 3–30 км. Через вплив іоносфери одночастотні приймачі рекомендовано використовувати для коротких векторів до 10 км, хоча деякі джерела допускають довжини до 15–30 км за дотримання методики спостережень.

У табл. 3.4 наведено середні квадратичні різниці для двочастотних (171 вектор, 2,6–88,9 км) і одночастотних (49 векторів, 2,6–29,8 км) приймачів та їх діапазони.

Таблиця 3.4

Результати порівняння СКП, обчислених за формулами (2.8) і (2.9) та отриманих з опрацювання спостережень, мм

Показники, мм	Тривалість спостережень, год						
	24	12	6	3	2	1	0,5
Двочастотні приймачі							
max	0,5	0,4	0,7	0,9	0,5	0,4	0,6
min	-1,8	-1,9	-2,2	-2,1	-2,3	-2,4	-8,9
δ	0,62	0,65	0,81	0,83	0,91	1,16	3,41
Одночастотні приймачі							
max	0,3	0,4	0,3	0,3	0,0	0,2	-0,1
min	-0,5	-0,9	-0,8	-0,9	-1,6	-1,9	-2,3
δ	0,26	0,37	0,39	0,48	0,77	0,85	1,11

У мережі №2 довжини векторів (2,6–88,9 км) розділено на 11 груп із кроком 5 км для векторів до 30 км і 10 км — для довжин від 30 до 89 км. Діапазони включають: 2–10 км, 10–15 км, 15–20 км, 20–25 км, 25–30 км, 30–40

км, 40–50 км, 50–60 км, 60–70 км, 70–80 км, 80–89 км. Графіки демонструють сильну залежність точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень і слабший зв'язок із довжиною векторів.

Завищені результати виникають через використання лише GPS-даних для векторів завдовжки 1–25 км. Додавання супутників ГЛОНАСС у перманентних станціях погіршує точність, що підтверджено отриманими даними. Формули доцільно застосовувати для оцінки точності супутникових мереж і визначення оптимальної тривалості спостережень, але лише для векторів до 30 км і тривалості 0,5–6 годин.

Побудова й модернізація державних мереж потребує врахування сучасного стану супутникових систем і низки чинників, які впливають на точність визначення координат пунктів. У ранніх дослідженнях [14] розглянуто створення мереж за допомогою супутникових технологій. Враховувалися такі аспекти, як інтервал реєстрації сигналів, кут відсічки, тип ефемерид, а також кількість вихідних пунктів: від двох до трьох і п'яти [14]. Тривалість спостережень також мала значення.

У цьому підрозділі аналізується вплив тривалості спостережень і відстаней між приймачами на точність визначення координат пунктів. Для встановлення залежності середньоквадратичної похибки координат використовувалися дані 20-денних спостережень на перманентних станціях у Швейцарії, що приймають сигнали GPS і ГЛОНАСС. Вихідні дані й координати станцій взято з [14], де вони прийняті за істинні.

На рис. 3.6 представлено карту розташування станцій (червоні кружечки) і схему мережі, де трикутниками позначені фіксовані пункти. Нормативи вказують, що запроектовані пункти повинні мати зв'язок щонайменше з трьома-чотирма пунктами вищого класу, причому бажано розміщення по периметру мережі [14]. Мережа містить 23 станції та 57 векторів довжиною від 20,2 до 76,6 км. На станціях використовуються двосистемні приймачі Trimble NetR5 і антени GNSS Choke та Zephyr Geodetic 2. Результати спостережень оброблено в програмі **Trimble Business Center** із використанням точних і бортових

залежно від тривалості спостережень, кількості та довжин векторів використано програму **STATISTICA**. Встановлено, що найкраща залежність точності від тривалості спостережень апроксимується натуральним логарифмом, що підтверджується графіком (рис. 3.7).

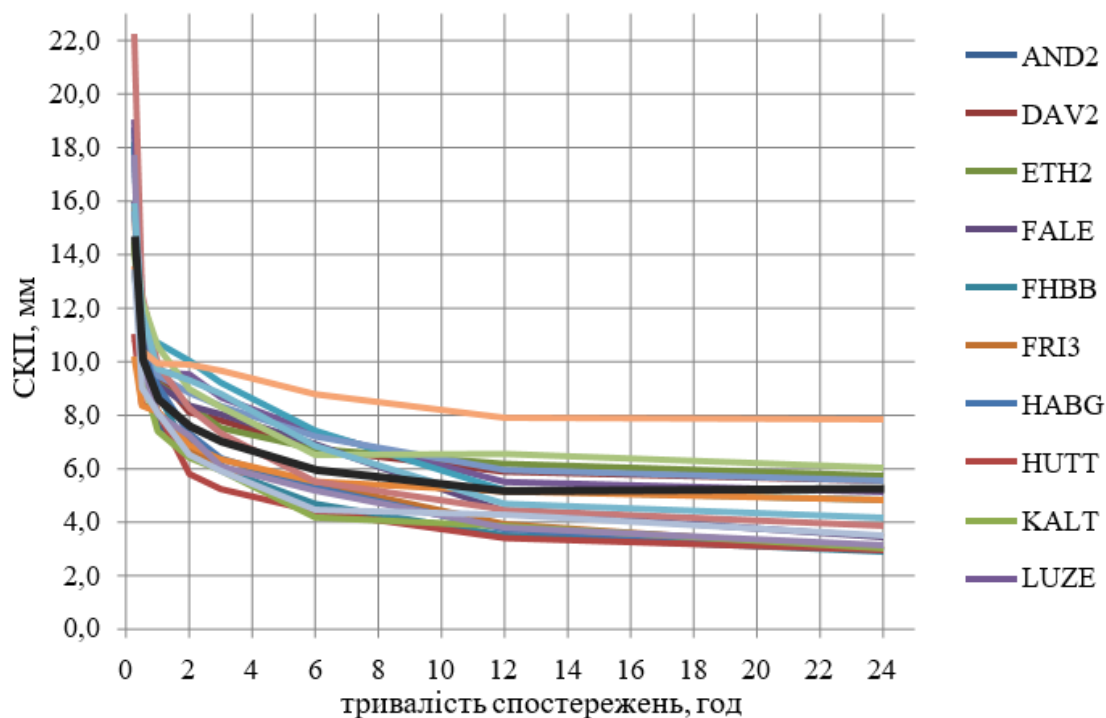


Рис. 3.7. Графік залежності СКП положення пунктів від тривалості спостережень

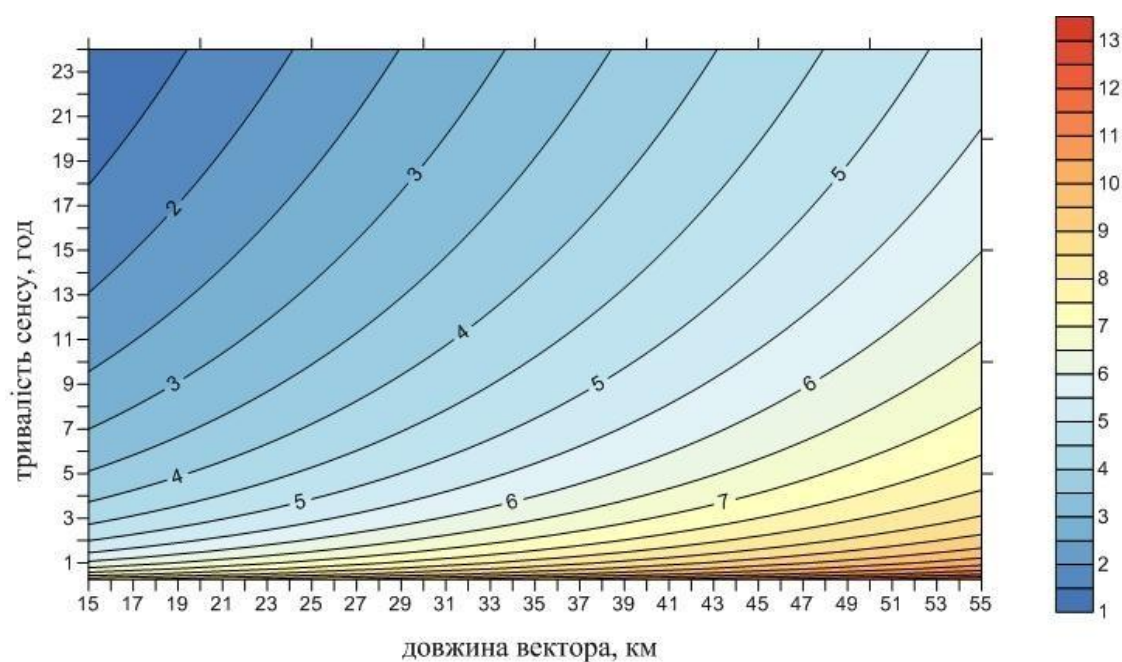


Рис. 3.8. Номограма визначення точності положення пунктів від довжин векторів та тривалості спостережень

На рис. 3.7 чорна лінія відображає середні значення СКП пунктів, визначені для різної тривалості сеансів.

Це підтверджує доцільність застосування натурального логарифма для опису зв'язку між точністю визначення положення пунктів і тривалістю спостережень. Також за допомогою програми Surfer створено номограму, що показує залежність точності від довжини векторів і тривалості спостережень.

3.2. Порівняння точності положення пунктів, визначених використовуючи системи NAVSTAR GPS та ГЛОНАСС

Сьогодні функціонують або вводяться в експлуатацію такі супутникові системи:

- **GPS (NAVSTAR)**, під управлінням Міністерства оборони США, є повністю сформованою та найбільш поширеною системою навігації у світі.
- **ГЛОНАСС**, система Російської Федерації, після занепаду у 2002 році відновлена до кінця 2011-го та планується до модернізації до 2025 року.
- **Galileo** – європейська система, що перебуває у процесі створення.
- **BEIDOU (COMPASS)** – китайська система, призначена для використання переважно в межах Китаю.
- **IRNSS** – індійська система, яка розробляється для функціонування в межах Індії.
- **QZSS** – японська система, спершу створена для комерційних цілей, що забезпечує навігацію, мобільний зв'язок і мовлення в Японії та сусідніх районах Південно-Східної Азії.

Серед перелічених супутникових систем найпрогресивнішими вважаються NAVSTAR GPS і ГЛОНАСС, які мають як спільні, так і відмінні риси у будові та принципах роботи [62]. Для виконання спостережень необхідно, щоб були видимі щонайменше чотири супутники одночасно. Проте навіть за нормальних умов виникають перешкоди, які блокують сигнали на окремих ділянках неба.

Збільшення кількості супутників покращує якість вимірювань та геометрію їх розташування [4].

Спільне використання сигналів GPS і ГЛОНАСС підвищує точність вимірювань завдяки збільшенню обсягу даних і зменшенню систематичних помилок, властивих кожній системі. Це також покращує контроль цілісності сигналів, забезпечуючи безперервність і надійність навігаційних визначень. Тому інтеграція GPS і ГЛОНАСС є перспективним напрямом розвитку глобальної навігаційної супутникової системи [17, 38, 49, 78, 101, 104, 108, 115, 117, 146].

Однак спільне використання систем ускладнюється через відмінності в їхній роботі. GPS і ГЛОНАСС мають різну кількість орбітальних площин і супутників у них, застосовують різні методи кодування сигналів та алгоритми розрахунку координат. Наприклад, у ГЛОНАСС використовується складніша модель обчислень, що вимагає більш потужного приймального обладнання [11].

Супутники ГЛОНАСС, на відміну від GPS, не синхронізовані з обертанням Землі, що забезпечує їх стабільність, хоча термін служби є відносно коротким [9, 10, 50, 88]. Точність ефемерид Міжнародної ГНСС-служби (IGS) для ГЛОНАСС удвічі гірша, ніж для GPS, але проблему активно вирішують [146]. Поправки до годинників ГЛОНАСС записуються як бортові значення, тоді як точність поправок GPS становить до 0,1 нс [80]. Також спільне використання систем ускладнюється відсутністю офіційної матриці переходу між координатними системами.

ГЛОНАСС ефективніше працює на високих широтах, а GPS – на середніх [9, 48, 161]. Через різні оцінки ефективності систем та впровадження приймачів для кількох ГНСС проведено дослідження на основі однодобових спостережень на перманентних станціях у Франції та Швейцарії. Дані з [130, 148] використовувалися для обчислення планових координат у проекції Гауса-Крюгера та їх порівняння з координатами супутникових мереж.

Розглянуто три мережі у Франції:

1. Перша – 12 станцій, 33 вектори (довжини 8,6–46,7 км).

2. Друга – 11 станцій, 28 векторів (13,4–41,1 км).

3. Третя – 11 станцій, 28 векторів (8,6–33,1 км).

На станціях використовували приймачі Trimble NetR5 і антени Zephyr Geodetic 2. Схеми мереж наведено на рис. 3.1 (трикутниками позначені вихідні пункти).

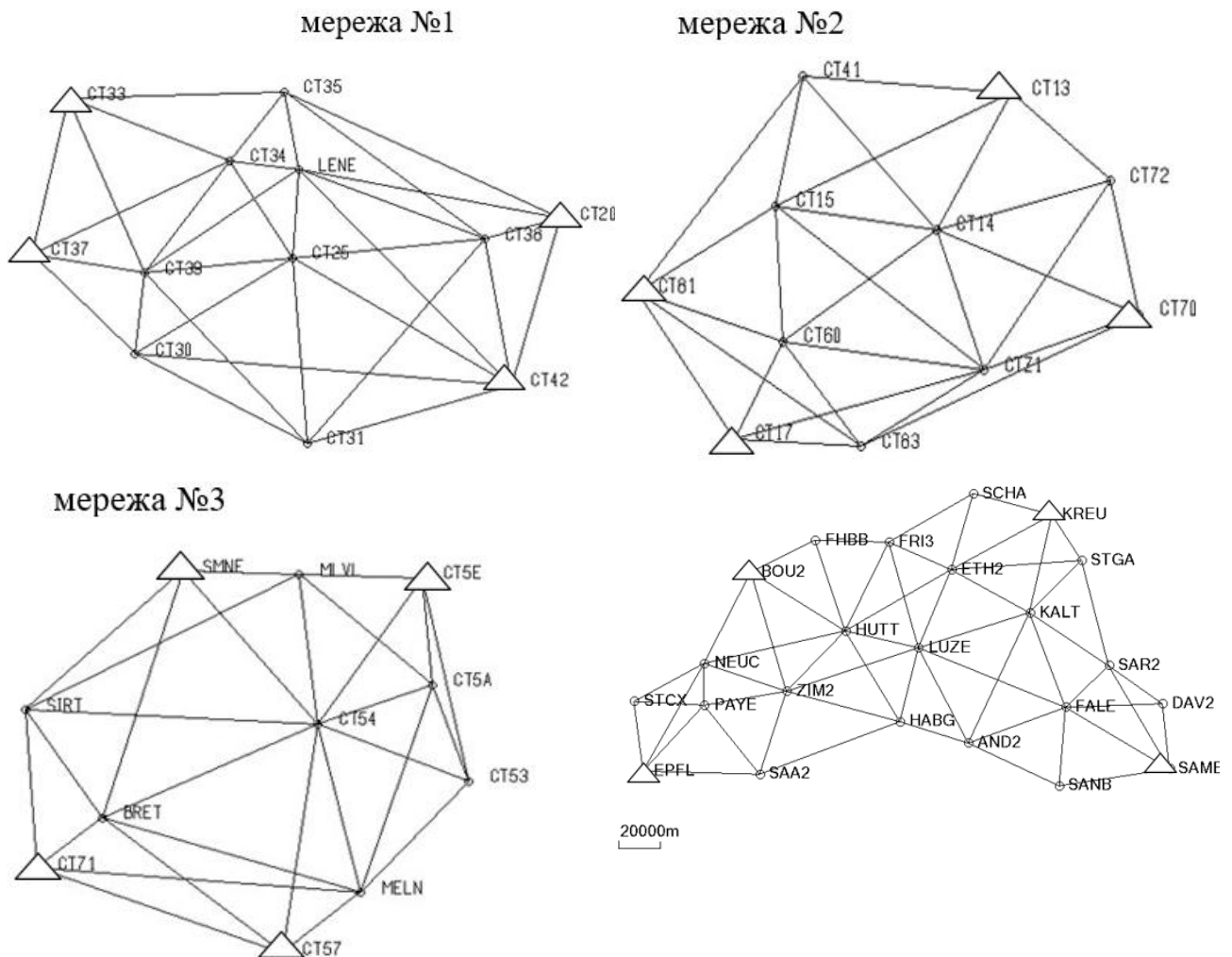


Рис. 3.9. Схеми мереж (№ 1, 2, 3 Франція та № 4 Швейцарія)

У Швейцарії створена мережа з 23 пунктів і 57 векторів на основі даних із перманентних станцій. Довжина векторів коливається від 20,2 до 76,6 км, що значно перевищує діапазон довжин інших мереж. На кожній станції використовуються приймачі Trimble NetR5 та антени GNSS Choke і Zephyr Geodetic 2. Схему мережі №4 зображено на рис. 3.9.

Результати спостережень оброблені програмою Trimble Business Center з використанням точних та бортових ефемерид. Кут відсікання становив 10° для мереж № 1, 2, 3 та 15° для мережі № 4. Інтервал реєстрації сигналів — 30 секунд.

Дослідження порівнювало точність координат, визначених за допомогою супутників GPS і ГЛОНАСС. Розглянуті два варіанти: сигнали обох систем і лише GPS. Завдяки можливості відключати супутники в програмі Trimble Business Center, ці варіанти були реалізовані. Аналіз результатів здійснено за допомогою програми RINEX Viewer, що перевірила всі rinex-файли однодобових спостережень на перманентних станціях для мереж. Для кожної мережі завантажено відповідно 12, 11, 9 і 23 файли. Програма дозволила визначити максимальну та мінімальну кількість супутників (від 8 до 21 год.), оскільки дослідження зібрані здебільшого в денний час. На рис. 3.10 показано, як змінюється кількість супутників GPS і ГЛОНАСС протягом доби для одного з пунктів (ст41).

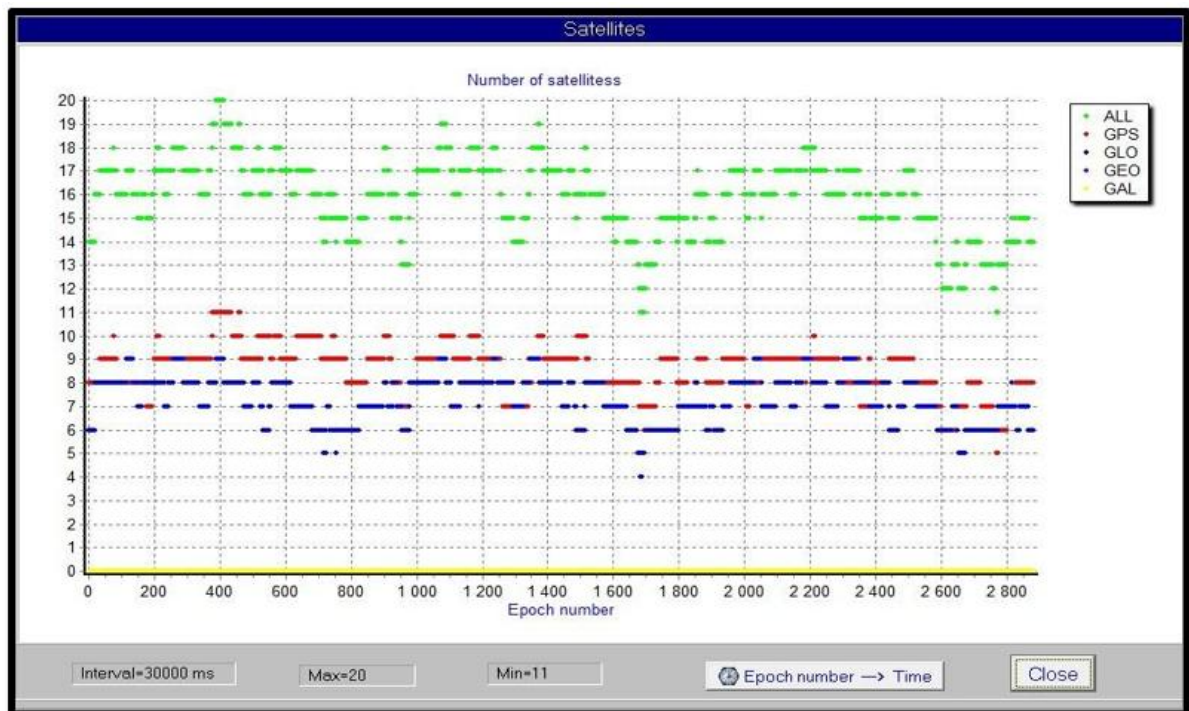


Рис. 3.10. Зміна кількості супутників для пункту ст41(мережа №2)

На рис. 3.10 вказано кількість супутників для певної епохи, час якої можна визначити за допомогою спеціальної опції програми. Протягом вказаного періоду були зафіксовані мінімальна і максимальна кількість супутників GPS і ГЛОНАСС, що спостерігалися на пунктах кожної мережі. Максимальна кількість супутників GPS на більшості станцій становить 10, на пункті Iene (мережа №1) – 11, а на ст81 (мережа №2), meln, mlvl, sirt, smne (мережа №3) – 12,

ct57, ct5a (мережа №3) – 9. Максимальна кількість супутників двох систем (GPS+ГЛОНАСС) зазвичай дорівнює 19, для деяких пунктів це число досягає 21, а для lene – 20, ct57 і ct5a – 18. Мінімальна кількість видимих супутників GPS у більшості випадків становить 6-7, на станціях lene (мережа №1), ct81 (мережа №2), mlvl, smne (мережа №3) – 8, а на ct5a, ct57 (мережа №3) – 5. Мінімальна кількість супутників двох систем одночасно спостерігається на рівні 10, на деяких пунктах – від 13 до 16 супутників. Аналогічний аналіз для мережі №4 показав мінімум 9 супутників для пункту HABG, а для решти від 10 до 16. Мінімальна кількість супутників GPS для SANB і HABG – 4, для інших – 5-8. Максимальна кількість супутників двох систем досягає 24 на десяти пунктах, GPS – 16 на станціях EPFL, FHBB, HUTT, PAYE, на інших – 11-15 супутників. Згідно з [108], для роботи з однією системою мінімум супутників має бути 5, для двох – 6.

З однодобових спостережень двосистемними двочастотними приймачами сформовано сеанси різної тривалості (24, 12, 6, 3, 2, 1 і 0,5 год). Для кожної мережі отримано по одному сеансу тривалістю 24 і 12 год, два сеанси 6 год та чотири сеанси 3, 2, 1 і 0,5 год. Для мережі №4 також сформовано чотири сеанси по 0,25 год і два сеанси по 12 год.

Після обробки сеансів мережі були врівноважені за результатами спостережень кожної тривалості. Для кожної мережі визначено чотири пункти, що розташовувалися по периметру, і їм присвоєні координати перманентних станцій. Після врівноваження отримано просторові координати пунктів за результатами спостережень. Обчислено планові координати в проекції Гауса-Крюгера та порівняно з координатами перманентних станцій, які прийняті за істинні. Обчислено різниці по x та y , що дозволило визначити помилки позиціонування. Для чотирьох мереж проведено порівняльний аналіз точності визначення пунктів з використанням сигналів GPS та ГЛОНАСС одночасно і окремо для GPS. Обчислено загальну кількість помилок за результатами спостережень різної тривалості та визначено кількість помилок, що задовольняють нерівності $\Delta_{2\text{системи}} < \Delta_{\text{GPS}}$ і $\Delta_{2\text{системи}} < \Delta_{\text{GPS}}$, а також

рівняння $\Delta_{2\text{системи}} = \Delta_{\text{GPS}}$ (табл. 3.5). Табл. 3.5 містить відсоткове значення помилок, що дозволяє оцінити якість вимірів для систем GPS та GPS + ГЛОНАСС. Для кожної мережі побудовані діаграми (рис. 3.11).

Таблиця 3.5

Результати порівняння точності визначення положення пунктів, отриманих за спостереженнями системи GPS та систем GPS + ГЛОНАСС

№ мережі	Загальна кількість помилок	Кількість	%	Кількість	%	Кількість	%
		$\Delta_{2\text{системи}} < \Delta_{\text{GPS}}$		$\Delta_{2\text{системи}} > \Delta_{\text{GPS}}$		$\Delta_{2\text{системи}} = \Delta_{\text{GPS}}$	
1	160	80	50,0	44	27,5	36	22,5
2	140	55	39,3	31	19,4	54	33,8
3	140	73	52,1	42	30,0	25	17,9
4	475	245	51,6	146	30,7	84	17,7
Разом	915	453	49,5	263	28,7	199	21,8

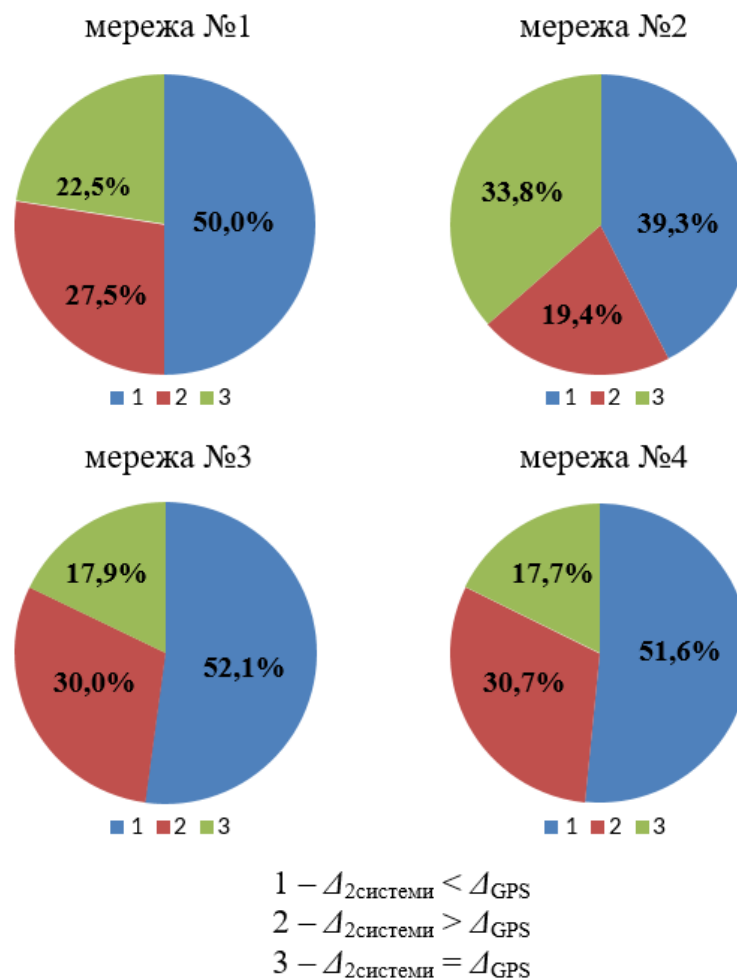


Рис. 3.11. Діаграми розподілу помилок положення пунктів, отриманих за спостереженнями системи GPS та двох систем GPS + ГЛОНАСС

Як видно з діаграм порівняння точності визначення положення пунктів, отриманих за допомогою супутників двох систем та тільки GPS, 47,3% пунктів трьох мереж визначено точніше за допомогою двох систем, 26,1% — з однаковою точністю, а 26,6% — з меншою. Для мережі №4 ці значення становлять відповідно 51,6%, 17,7% та 30,7%. Отже, спільне використання двох систем підвищує точність визначення положення, але незначно порівняно з GPS.

Для перевірки гіпотези про рівність дисперсій координат, визначених за допомогою GPS і GPS + ГЛОНАСС, застосовано критерій Фішера, що підтвердив попередні висновки.

Проте одночасне спостереження супутників GPS і ГЛОНАСС покращує точність визначення при коротких сеансах спостережень (3–0,25 год). На прикладі мережі №4 видно, як точність змінюється зі зменшенням тривалості спостережень при використанні обох систем (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

Результати порівняння точності визначення положення пунктів мережі №4, отримані при різній тривалості сеансів спостережень дво- та односистемними приймачами

Тривалість сеансу, год	Загальна кількість помилок	Кількість %		
		$\Delta_{2\text{системи}} < \Delta_{\text{GPS}}$	$\Delta_{2\text{системи}} > \Delta_{\text{GPS}}$	$\Delta_{2\text{системи}} = \Delta_{\text{GPS}}$
24	19	21,1	10,5	68,4
12	38	28,9	31,6	39,5
6	38	26,3	39,5	34,2
3	76	46,1	34,2	19,7
2	76	47,4	32,9	19,7
1	76	56,6	31,6	11,8
0,5	76	60,5	35,5	3,9
0,25	76	78,9	19,7	1,3

За результатами наведеними у табл. 3.6 побудовані діаграми (рис. 3.12).

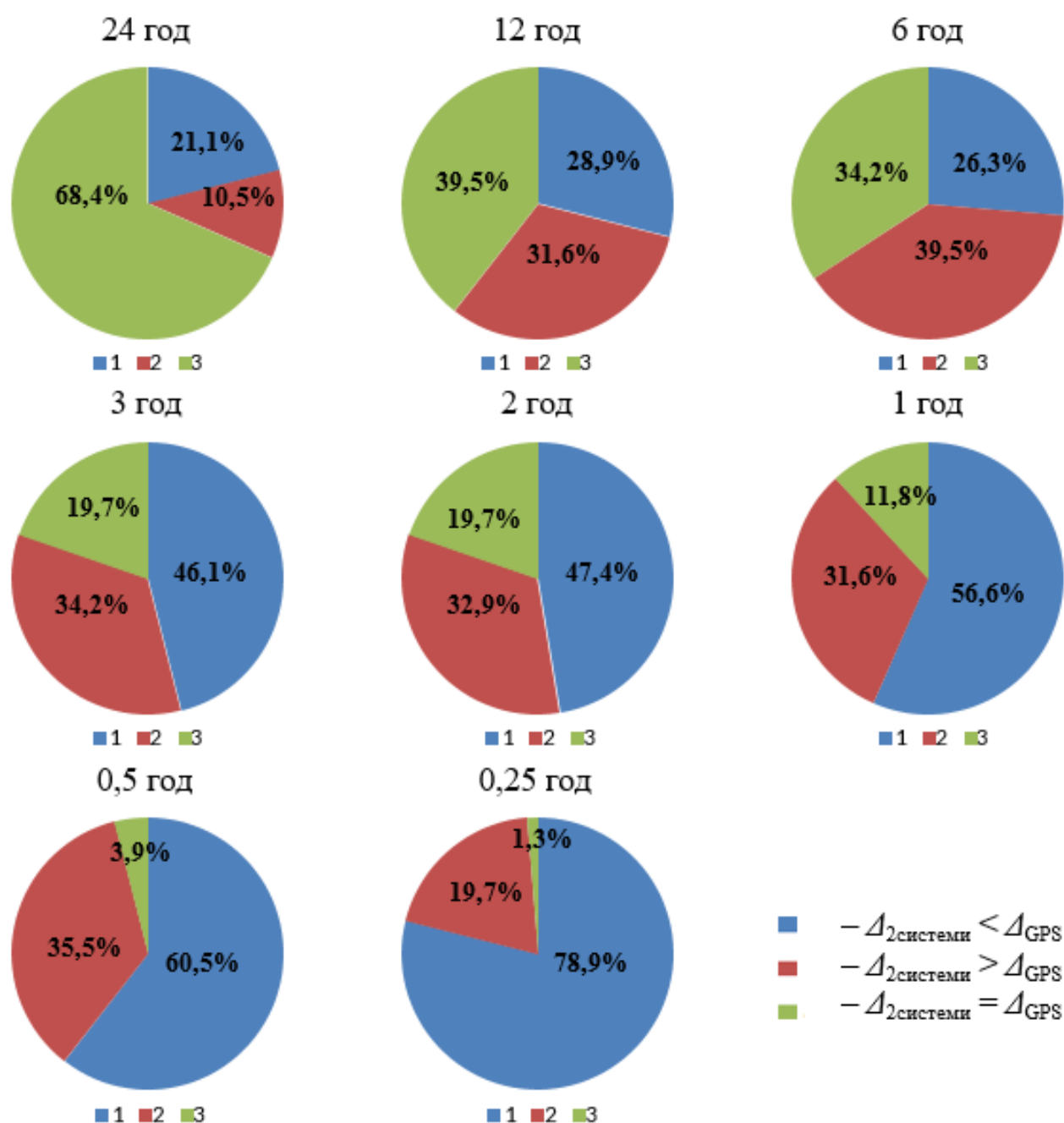


Рис. 3.12. Діаграми розподілу помилок положення пунктів, отриманих за спостереженнями системи GPS та GPS + ГЛОНАСС при різній тривалості сеансів спостережень

Діаграми підтверджують, що якість вимірів покращується при використанні супутників двох систем та зменшенні часу спостережень.

3.3. Дослідження залежності точності визначення координат пунктів від кута відсічки в мережах, створюваних з допомогою систем GPS і ГЛОНАСС

За останні роки відбулися значні зміни в глобальних навігаційних супутникових системах (ГНСС), які стали доступними для цивільного використання. Покращилась якість супутникового обладнання та збільшилась кількість супутників. Зокрема, з 2010 року запускаються GPS-супутники нового типу Block II-F, що мають покращену стабільність сигналів, а також планується запуск Block III-A. Наразі космічний сегмент GPS складається з 32 супутників, а ГЛОНАСС має 29 супутників після завершення формування його сегменту у 2010 році. Обидві системи мають номінальну кількість по 24 супутники. Також модернізовано наземний сегмент ГНСС, і тепер приймачі можуть одночасно працювати з сигналами GPS і ГЛОНАСС, що збільшило кількість вимірюваних величин. Це вимагає перегляду методики супутникових спостережень, зокрема кута відсічки – висоти супутників над горизонтом. Значення кута встановлюються залежно від точності вимірювань, і воно було визначене для ситуації, коли працювала лише одна система GPS з меншим числом супутників. Зменшення кута дозволяє приймати сигнали від більшої кількості супутників, що підвищує точність вимірів. Водночас, використання двох систем ГНСС зменшує негативний вплив високих значень кута на точність визначення позиції. Це особливо корисно в умовах обмеженої видимості супутників, наприклад, в гірських районах або містах.

Однак сигнали супутників, що знаходяться близько до горизонту, можуть зазнавати спотворень через атмосферні явища. Тому рекомендується встановлювати оптимальний кут відсічки від 5° до 20° для покращення точності вимірів. Метою цього дослідження є оцінка впливу кута відсічки на точність визначення положення з використанням односистемних і двосистемних приймачів за різної тривалості спостережень. Для дослідження були використані дані перманентних станцій на півночі Франції, обладнаних двосистемними

приймачами TRIMBLE NetR5. Зібрані дані для тривалості спостережень шість діб та просторові координати станцій, що взяті за істинні, порівнювались з координатами мереж, визначеними за різних умов. Для аналізу сформовані три мережі з різною кількістю станцій та векторів, довжина яких варіюється від 8,6 до 49,0 км.

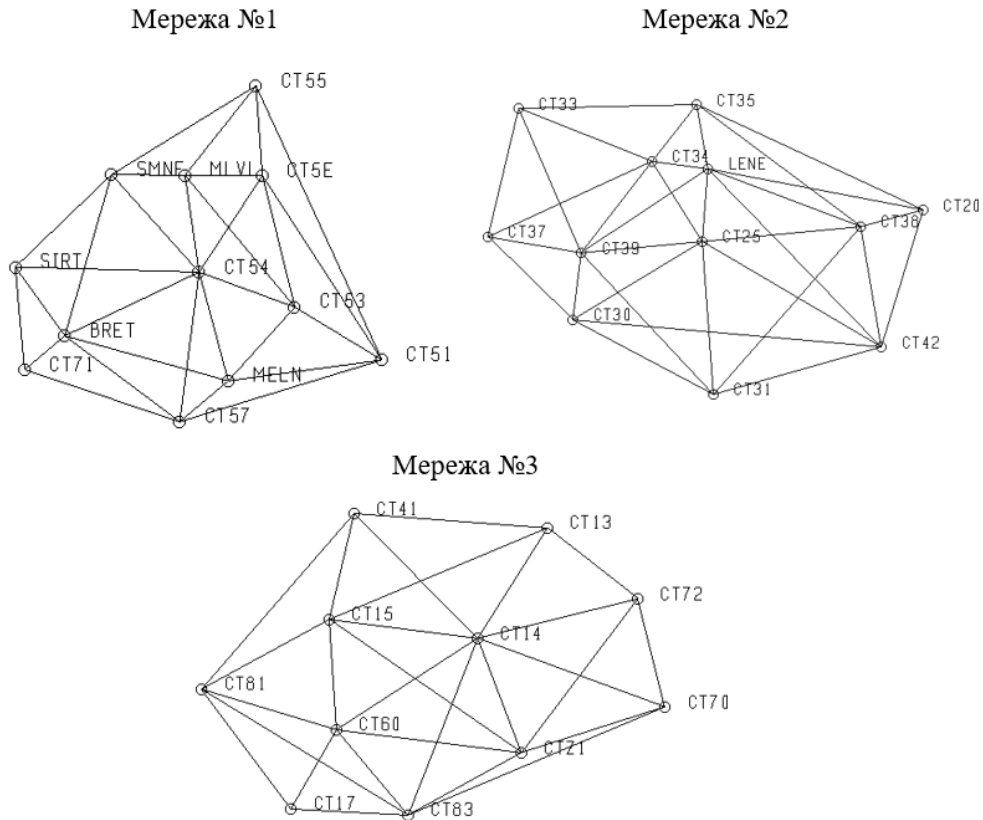


Рис. 3.13. Схеми мереж

Обробка результатів спостережень виконана за допомогою Trimble Business Center, яка дозволяє встановлювати кути відсічки, виключати певні супутники та не враховувати результати на частоті L2. Ці можливості використано для формування сеансів спостережень різної тривалості з дво- та одночастотними приймачами при різних кутах відсічки. Для обробки даних застосовували бортові та остаточні ефемериди, а дискретність сигналу складала 30 секунд. Програмним забезпеченням RTKLIV проаналізовано спостереження на перманентних станціях за шість діб, визначено кількість супутників GPS і ГЛОНАСС у проміжку 8:00–21:00 (час обрано для денних сеансів спостережень). За кута відсічки 0° максимальна кількість супутників становила 20, мінімальна — 12. На графіку (рис. 3.14) для пункту CT25 показано динаміку кількості

супутників протягом першого дня спостережень. Найбільше супутників спостерігалось близько 12:00, найменше — о 16:00 (GPS-час). Також визначено максимальну та мінімальну кількість супутників для кожної системи при кутах відсічки 10° , 15° , 30° і 40° . У більшості пунктів протягом шести діб характер змін кількості супутників залишався стабільним. У табл. 3.7 наведено дані для різних кутів відсічки.

Таблиця 3.7

Кількість супутників при кутах відсічки 10° , 15° , 30° , 40°

	Кут відсічки							
	10°		15°		30°		40°	
	GPS	ГЛОНАСС	GPS	ГЛОНАСС	GPS	ГЛОНАСС	GPS	ГЛОНАСС
макс.	11	9	10	8	8	6	6	4
мін.	6	5	5	4	4	3	2	2

Проаналізовано залежність GDOP від кута відсічки для кожної системи. При висоті супутників 10° за шість діб GDOP для GPS здебільшого не перевищував трьох, окрім пункту СТ54 (5,4). У системі ГЛОНАСС GDOP залишався нижче чотирьох для всіх пунктів. При куті 15° GDOP для ГЛОНАСС не перевищував 4,8, тоді як для GPS на пункті СТ54 досягав 7. При висоті 30° для GPS іноді фіксувалося перевищення GDOP понад 10, а при 40° таких випадків побільшало. У ГЛОНАСС при 30° показник зрідка перевищував 10, а при 40° досягав 24. Оскільки значних змін за шість діб не зафіксовано, графіки побудовано для одного пункту. На рис. 3.14 і 3.15 показано зміну кількості супутників та GDOP для пункту СТ54 при кутах 10° і 30° . Програма дозволяє аналізувати GDOP для окремих систем. Загалом, при використанні сигналів обох систем і врахуванні часу спостережень точність позиціонування залишається прийнятною при куті відсічки 30° . Для кожної мережі створено шість сеансів спостережень із GPS-приймачами тривалістю від 0,25 до 24 годин. Також підготовлено дані для обох систем. У трьох мережах оброблено 12096 сеансів за шість діб, у результаті чого отримано планові координати пунктів. Для оцінки точності координати порівнювали з істинними значеннями й обчислювали СКП. Результати для різної тривалості сеансів і кутів відсічки наведено в табл. 3.8.

Таблиця 3.8

Середні значення СКП положення пунктів визначених при кутах відсічки
0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 30°, 40° в мм

Тривалість сеансу, год	Кут відсічки, °						
	0	5	10	15	20	30	40
<i>l</i>	2	3	4	5	6	7	8
Двочастотні приймачі							
Система GPS							
24	5,5	5,6	5,6	5,6	5,5	5,9	6,0
12	6,5	6,5	6,4	6,5	6,4	5,9	8,0
6	7,0	7,0	7,1	6,9	6,7	6,5	10,1
3	7,5	7,5	7,5	7,5	7,3	7,6	9,5
2	8,1	8,0	8,1	8,0	7,9	8,0	15,2
1	8,2	8,3	8,3	8,1	8,0	7,9	34,1
0,5	9,4	9,5	9,4	8,9	8,8	13,2	140,1
0,25	15,4	15,4	15,4	11,1	11,4	20,0	173,9
Системи GPS+ГЛОНАСС							
24	5,6	5,6	5,6	5,5	5,8	5,8	5,6
12	6,6	6,6	6,6	6,5	6,4	6,3	6,1
6	7,0	7,0	7,0	7,0	6,8	6,4	6,6
3	7,5	7,5	7,5	7,3	7,4	7,0	7,2
2	7,8	7,8	7,8	7,7	7,6	7,4	7,8
1	8,2	8,2	8,2	7,9	7,9	7,7	10,3
0,5	9,0	9,0	9,0	8,4	8,2	9,5	14,7
0,25	12,0	12,0	12,0	8,9	9,1	11,4	66,0
Одночастотні приймачі							
Система GPS							
24	21,8	16,7	16,7	16,4	15,4	13,5	14,4
12	17,8	17,8	17,8	17,3	16,3	14,7	22,2
6	18,6	18,7	18,7	17,8	17,2	17,2	29,1
3	21,1	21,1	21,1	20,7	20,1	18,7	26,2
2	22,2	22,2	22,2	21,9	21,5	22,9	77,0
1	23,3	23,3	23,3	22,8	21,9	42,2	229,1
0,5	27,6	27,6	27,6	30,5	39,8	57,8	235,5
0,25	53,4	53,8	53,4	56,9	75,4	99,7	227,3
Системи GPS+ГЛОНАСС							
24	15,2	15,1	15,2	16,2	16,7	14,4	10,6
12	18,3	18,1	18,3	18,8	18,1	16,0	15,3
6	19,9	19,8	19,9	20,4	17,9	15,6	17,7
3	21,2	21,1	21,2	20,2	18,6	16,7	17,2
2	21,2	21,2	21,2	20,3	19,5	17,8	19,0
1	21,4	21,4	21,4	21,6	19,4	18,2	36,9
0,5	22,7	22,7	22,7	21,8	21,9	26,3	320,5
0,25	27,7	29,0	27,7	26,3	35,8	51,9	145,2

Також визначено максимальну й мінімальну кількість супутників для кожної системи при різних кутах відсічки (10°, 15°, 30°, 40°). Протягом шести

діб характер зміни кількості супутників для більшості пунктів залишався стабільним. Згідно з табл. 3.8, на рис. 3.14 і 3.15 показано графіки залежності точності визначення положення пунктів від кутів відсічки за різної тривалості спостережень дво- та одночастотними приймачами для систем GPS та GPS+ГЛОНАСС.

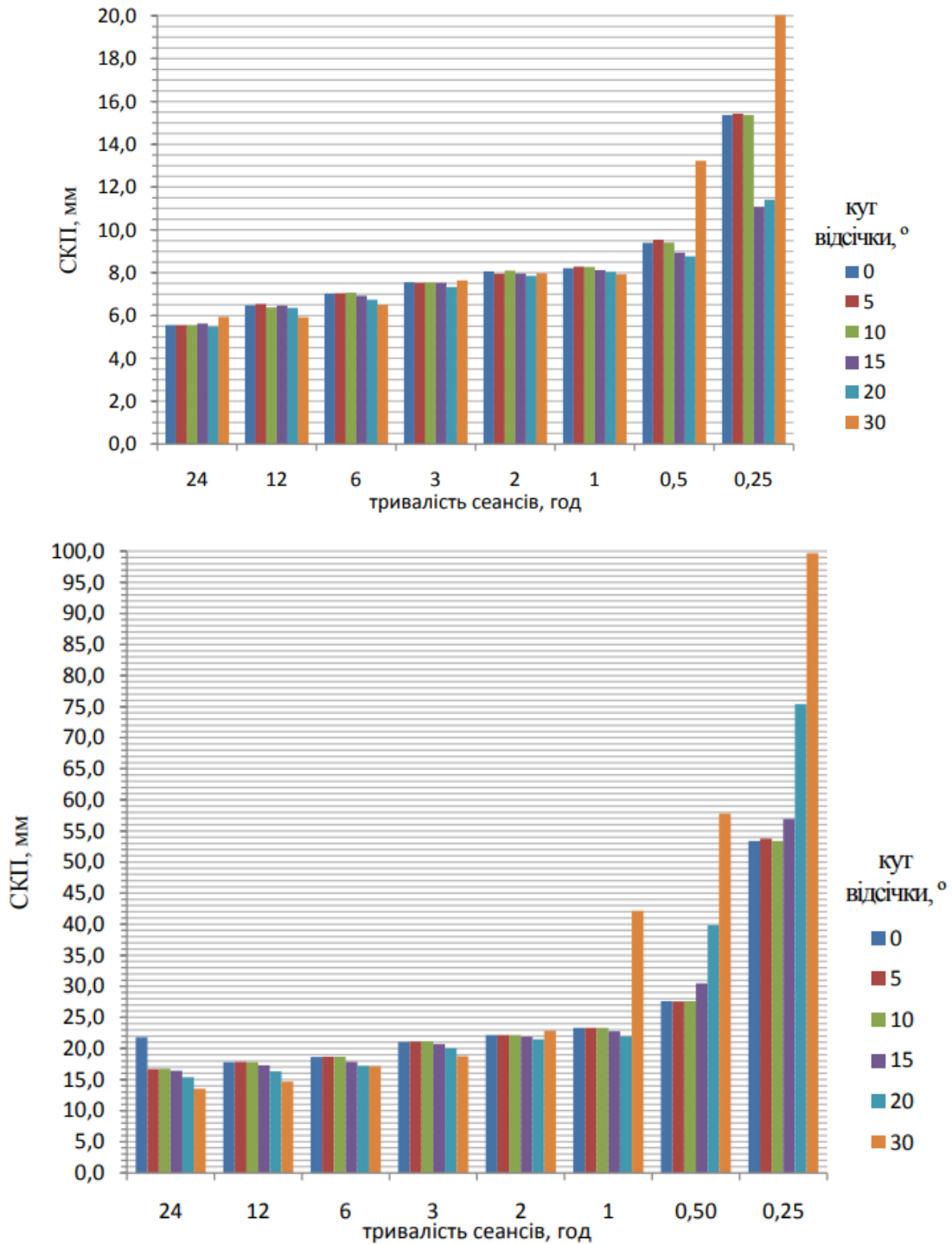


Рис. 3.14. Графіки залежності точності положення пунктів від кута відсічки (0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 30°) при різній тривалості спостережень односистемними двочастотними (а) та одночастотними (б) приймачами

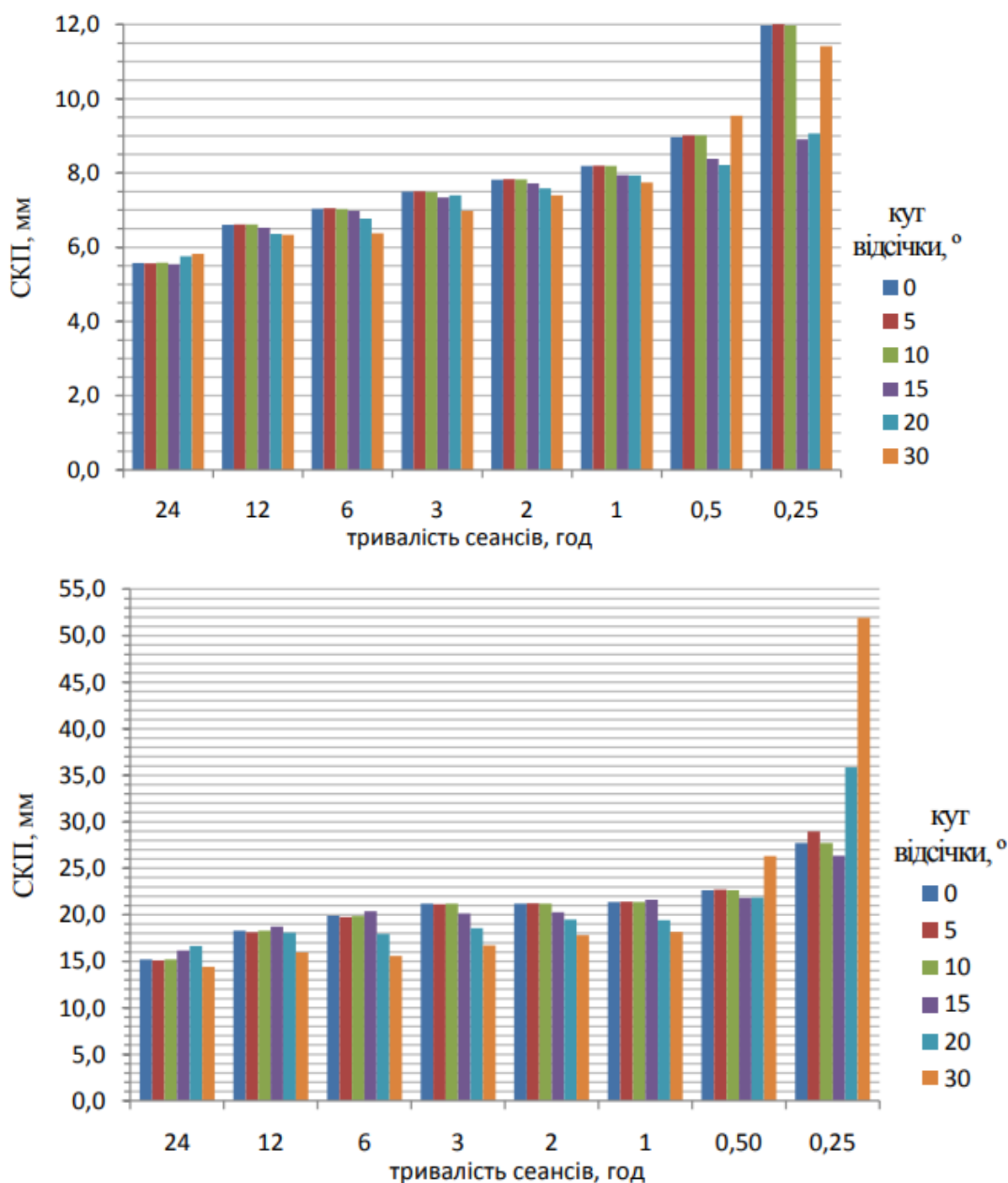


Рис. 3.15. Графіки залежності точності положення пунктів від кута відсічки (0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 30°) при різній тривалості спостережень двосистемними двочастотними (а) та одночастотними (б) приймачами.

Зазначимо, що графіки побудовані для кутів відсічки 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 30° , оскільки СКП для кута 40° , особливо при коротких сеансах, досягає максимальних значень, що ускладнює коректне відображення зміни точності для вказаних кутів. Як видно (див. рис. 3.14 і 3.15), точність визначення положення пунктів залежить від тривалості сеансів спостережень і кута відсічки. Для

формулювання висновків ми провели детальний аналіз максимальних значень СКП. У табл. 3.9 наведено кути відсічки, при яких максимальні СКП для трьох мереж мають мінімальні та максимальні значення за результатами спостережень супутників GPS і ГЛОНАСС.

Як видно з результатів спостережень різної тривалості, найменшу точність положення пунктів спостережено при куті відсічки 40° . При 24-годинних спостереженнях двочастотними приймачами точність для першої мережі найвища при кутах 0° і 10° , для другої – при 20° , а для третьої – при 40° . Для коротших сеансів (від 12 до 1 години) найкраща точність спостерігається для кутів від 20° до 30° , а для 0,5 і 0,25 год – при кутах 5° і 20° . Підвищення кута відсічки погіршує точність. Для одночастотних приймачів найкраща точність досягнута при кутах від 20° до 30° під час спостережень тривалістю 1 год і менше.

За результатами 24-годинних спостережень двосистемними двочастотними приймачами найвища точність досягнута при кутах 15° (для третьої мережі – 5°). Зниження кута відсічки зменшує точність, а найгірші результати зафіксовано для кутів 30° і 40° для першої мережі. Найкраща точність при тривалості 12 год отримана для кутів 20° - 40° , а для коротших сеансів оптимальним є кут 30° . При сеансах тривалістю менше 1 год точність знижується з підвищенням кута відсічки через зменшення кількості доступних супутників.

Для досягнення оптимальної точності рекомендується використовувати супутники з висотою не менше 5° над горизонтом і встановлювати кут відсічки в діапазоні 15° - 30° , залежно від тривалості сеансу. Для 24, 12, 6, 3, 2, 1 год можна вибирати більші значення кута, а для 30 і 15 хв – менші.

Порівняння результатів використання двох систем показало, що для кутів від 10° до 30° супутники двох систем переважно забезпечують кращу точність, за винятком кута 40° , де спостерігається різке збільшення помилок.

Таблиця 3.9

Кути відсічки, для яких отримані найменші і найбільші СКП положення пунктів, визначені за результатами спостережень одно- та двосистемними дво- і одночастотними приймачами

№ мережі	Односистемні приймачі															
	Двочастотні приймачі								Одночастотні приймачі							
	Тривалість сеансу, год								Тривалість сеансу, год							
	24	12	6	3	2	1	0,5	0,25	24	12	6	3	2	1	0,5	0,25
min																
1	0,10	30	20	20	20	30	5	20	0	30	20	30	30	0,10, 20	5	5
2	20	30	30	20	30	0,10	20	5	40	30	30	20	20	20	15	15
3	40	30	30	40	30	30	20	20	30	30	30	30	30	20	0	15
max																
1	40	40	40	40	40	40	40	40	15	40	40	40	40	40	40	40
2	30	40	40	40	40	40	40	40	0	40	40	40	40	40	40	40
3	15	40	40	10-15	40	40	40	40	5	40	40	0-10	40	40	40	40
№ мережі	Двосистемні приймачі															
	Двочастотні приймачі								Одночастотні приймачі							
	Тривалість сеансу, год								Тривалість сеансу, год							
	24	12	6	3	2	1	0,5	0,25	24	12	6	3	2	1	0,5	0,25
min																
1	15	40	30	30	30	15,30	15	15	40	40	30	40	30	20	20	0,10
2	15	30	30	30	30	0-10,30	20	15-20	40	30	30	30	30	30	20	0-10
3	5	20	30	30	30	30	15	20	40	30	30	30	30	30	30	20
max																
1	40	15,30	5	0-10, 40	5,40	40	40	40	20	15	15	0-10	0	40	40	40
2	30	15	0,40	40	40	40	40	40	20	20	15	0,10	0-10	40	40	40
3	30	15	15	20	0-15	40	40	40	15	0,10	40	5	40	40	40	40

Таблиця 3.10

Результати порівняння точності положення пунктів, отриманих за спостереженнями системи GPS та GPS + ГЛОНАСС для двочастотних приймачів

Тривалість сеансу, год	Загальна кількість помилок	Кількість	%	Кількість	%
		$M_{2\text{системи}} \geq M_{\text{GPS}}$		$M_{2\text{системи}} < M_{\text{GPS}}$	
24	136	71	52,2	65	47,8
12	136	86	63,2	50	36,8
6	136	68	50,0	68	50,0
3	136	53	39,0	83	61,0
2	136	39	28,7	97	71,3
1	136	54	39,7	82	60,3
0,5	136	42	30,9	94	69,1
0,25	136	7	5,1	129	94,9

Відповідно для одночастотних приймачів у табл. 3.11 наведені результати порівняння якості вимірів, одержаних при використанні супутників системи тільки GPS та супутників двох систем GPS і ГЛОНАСС.

Таблиця 3.11

Результати порівняння точності положення пунктів, отриманих за спостереженнями системи GPS та GPS + ГЛОНАСС для одночастотних приймачів

Тривалість сеансу, год	Загальна кількість помилок	Кількість	%	Кількість	%
		$M_{2\text{системи}} \geq M_{\text{GPS}}$		$M_{2\text{системи}} < M_{\text{GPS}}$	
24	136	63	46,3	73	53,7
12	136	96	70,6	40	29,4
6	136	92	67,6	44	32,4
3	136	36	26,5	100	73,5
2	136	22	16,2	114	83,8
1	136	18	13,2	118	86,8
0,5	136	0	0,0	136	100,0
0,25	136	4	2,9	132	97,1

За результатами наведеними у табл. 3.10 та 3.11 побудована діаграма для сеансів різної тривалості, яка показана на рис. 3.16.

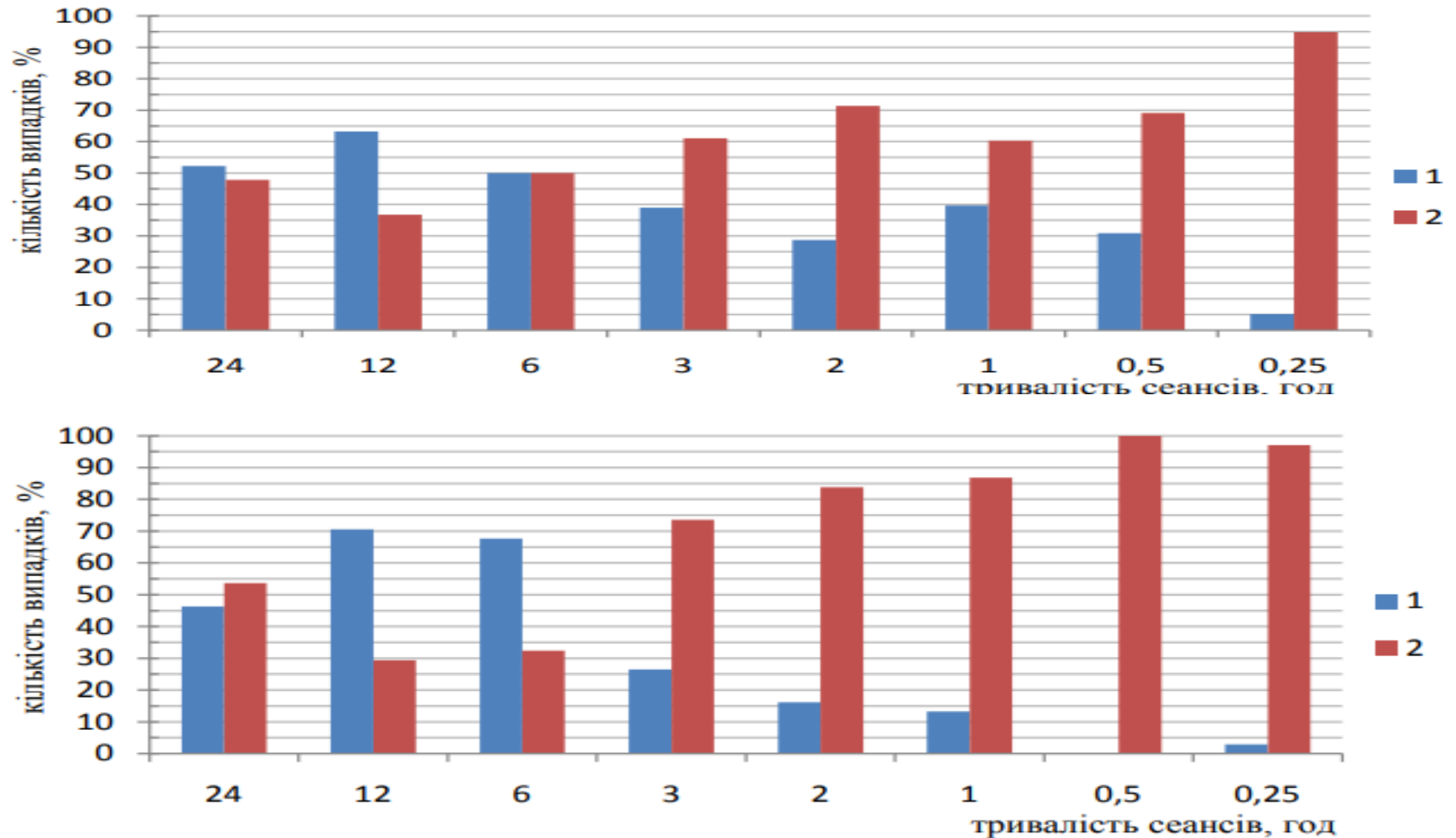


Рис. 3.16. Діаграми розподілу СКП положення пунктів, отриманих за спостереженнями системи GPS та GPS + ГЛОНАСС при різній тривалості сеансів спостережень двочастотними та одночастотними приймачами. 1 – кількість випадків, коли $M_{2\text{системи}} \geq M_{\text{GPS}}$, 2 – $M_{2\text{системи}} < M_{\text{GPS}}$.

Як видно з рис. 3.16, ефективність використання сигналів супутників ГЛОНАСС залежить від тривалості сеансів спостережень. При тривалості 24, 12 і 6 год підвищується точність у 37-50% випадків при використанні обох систем, а в 50-63% випадків — лише GPS. При спостереженнях тривалістю 3 год і менше точність підвищується у 60-95% випадків при використанні двох систем. Для одночастотних приймачів це становить 29-54% випадків при тривалості 24-6 год та 74-100% при тривалості 3-0,25 год. Таким чином, позитивний ефект використання сигналів ГЛОНАСС спостерігається лише при сеансах до 3 годин.

Проаналізовано ефективність спільного використання супутників GPS і ГЛОНАСС. З'ясовано, що при скороченні тривалості спостережень (особливо до 0,5–0,25 год) точність визначення положення пунктів підвищується завдяки використанню обох систем. Водночас за тривалості сеансів понад три години одночасне застосування GPS та ГЛОНАСС виявилось малоефективним.

Досліджено вплив кута відсічки на точність позиціонування пунктів мереж при різній тривалості спостережень дво- та одночастотними приймачами. Результати показали, що варто приймати сигнали супутників, які знаходяться не нижче 5° над горизонтом. Оптимальний кут відсічки для забезпечення максимальної точності визначається в діапазоні $15\text{--}30^\circ$: за тривалості сеансів 24, 12, 6, 3, 2, 1 год слід обирати вищі значення, а для 30 або 15 хв – нижчі.

Отримані результати підтверджують, що використання точних ефемерид дозволяє скоротити тривалість спостережень у мережах із довгими векторами.

4. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Охорона природи включає систему правових економічних заходів, що спрямовані на зменшення забруднення навколишнього середовища через господарську діяльність, вона регулюється законом України “Про охорону природного навколишнього середовища”.

В сільському господарстві важливе значення має система заходів, спрямована на раціональне використання земель, захист їх від шкідливих антропогенних викидів, а також на підвищення родючості ґрунтів.

Технологій вирощування сільськогосподарських культур, які включають в себе обробіток ґрунту, використання неорганічних добрив, хімічних засобів боротьби з шкідниками і хворобами повинна опрацьовуватись з глибоким знанням справи науково обґрунтовано, щоб зберегти життєве середовище екологічно чистим, придатним для життєдіяльності людей.

Пріоритетним завданням щодо управління земельними ресурсами є охорона земель. Основна мета охорони земель – це впровадження правових, організаційних та економічних заходів, спрямованих на відтворення та підвищення родючості земель, запобігання необґрунтованому вилученню земель із сільськогосподарського обороту, захист від шкідливих антропогенних впливів.

В процесі формування ґрунтів рельєф відіграє значну роль в поєднанні з кліматичними умовами, ґрунтоутворними породами, зволоженням та діяльністю людини, що призводить до утворення різних ґрунтів.

Формування ґрунтів тут відбувалось в умовах двох протилежних процесів ґрунтоутворення: підзолистого і дернового. Тому в залежності від інтенсивності прояву того чи іншого процесу і утворились різні типи і підтипи ґрунтів з характерними для них агрохімічними властивостями і відповідною природною родючістю.

Враховуючи категорії земель, крутизну схилів, агротехніку вирощування сільськогосподарських культур, для земель сільської ради розроблено комплекси обробітку ґрунту і поліпшення угідь. На території сільської ради агротехнічні

заходи застосовуються для збереження та збільшення вмісту гумусу (внесення органічних добрив люпину, гірчиці білої та інші), використовуються бактеріальні добрива для інокуляцій насіння бобових багаторічних трав з метою збагачення ґрунтів на азот.

Актуальним є питання наявності ґрунтів з високою кислотністю (РН – 4.5 - 5.5), які вимагають хімічної меліорації шляхом вапнування. Зустрічаються випадки забруднення ґрунтів пестицидами, мінеральними добривами, розчинними паливно – мастильними матеріалами, стічними водами тваринницьких ферм з надмірним вмістом гноївки, а також стоками промислових, зокрема переробних підприємств, побутовими стоками. Також зустрічаються механічні забруднення камінням, висока забур'яненість ґрунтів. Все це призводить до деградації ґрунтів, ускладнює їх обробіток, знижує їх родючість, виводить певні площі землі і з сільськогосподарського вжитку, зменшує площі орних земель.

Вода – один із найважливіших екологічних чинників, без якого життя на землі не можливе. Вода це основа життя людини, тому її треба зберігати.

Для того аби запобігти забрудненню води, господарські двори і ферми розміщують якнайдалі від водних джерел з дотриманням усіх умов охорони.

Забруднення поверхневих вод та підземних вод призводить до зміни фізичних властивостей, що шкідливо впливає на людину, природу і сільськогосподарське виробництво.

Всі речовини, що забруднюють води і які викликають у них якісні зміни розподіляються на: мінеральні, органічні, бактеріальні і біологічні.

Водні джерела постійно накопичують продукти ерозії, від чого поступово німіють, втрачають свою економічну роль. Щоб ця роль зберігалась, у сільській раді систематично здійснюються заходи запобігання замулювання річки і водоймищ. Серед них виділяють протиерозійну організацію території, задержання схилів, лісомеліоративні заходи.

Атмосферне повітря належить до категорії невичерпних ресурсів, однак господарська діяльність людини впливає на атмосферу і змінює склад повітря.

Ці зміни можуть бути настільки суттєвими, що виникає потреба охорони повітряного басейну.

Основними джерелами забруднення атмосферного повітря є викидні гази двигунів тракторів, автомобілів, комбайнів та інших машин, які використовуються на виробництві, викиди побутових підприємств, випаровування у повітря шкідливих газів з тваринницьких ферм, зокрема при несвоєчасній чистці приміщень та неправильному зберіганні та використанні, втратах на машинних дворах, у майстернях, накопичення у тваринницьких приміщеннях аміаку, вуглекислого газу та шкідливих мікроорганізмів при відсутності належної вентиляції.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі детально розглянуто технологію створення геодезичних мереж із застосуванням GPS-приймачів і електронних тахеометрів.

Проведено дослідження, що аналізує залежність точності визначення довжин векторів у мережі від тривалості сеансів спостережень та відстаней між приймачами. За результатами досліджень вивчено вплив тривалості сеансів, кількості та довжин векторів на точність визначення положення пунктів геодезичних мереж.

Аналіз ефективності одночасного використання сигналів супутників GPS і ГЛОНАСС показав, що спільне спостереження цих систем підвищує точність визначення положення пунктів при тривалості сеансів до 3 годин. Найбільша ефективність досягається при використанні двосистемних приймачів за тривалості спостережень 0,5–0,25 год. У разі спостережень тривалістю понад 3 години доцільніше використовувати тільки систему GPS.

Проведено дослідження точності визначення положення пунктів супутникових мереж залежно від тривалості спостережень (24, 12, 6, 3, 2, 1, 0,5, 0,25 год) і кута відсічки (0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 30° , 40°) для одно- та двосистемних, одно- та двочастотних приймачів. Отримані результати дозволяють визначити оптимальні значення кута відсічки для різної тривалості спостережень. Зокрема, рекомендовано приймати сигнали супутників, які розташовані не нижче 5° над горизонтом, а для обробки даних використовувати кут відсічки в діапазоні 15° – 30° , що забезпечує максимальну точність визначення положення пунктів.

Отримані результати досліджень дозволяють оптимізувати процес проєктування та створення геодезичних мереж із використанням сучасних можливостей ГНСС.

Особлива увага приділена екологічним аспектам виконання робіт.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Ващенко В., Літинський В., Перій С. Геодезичні прилади та приладдя: [навч. посіб.] – 3-тє вид. / – Львів: Євросвіт, 2009. – 208 с.
2. Віват А., Літинський В., Колгунов В., Покотило І. Дослідження точності визначення координат GPS методом в режимі RTK. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2011. №74. С.52-59.
3. Геодезичний енциклопедичний словник. / За ред. Володимира Літинського – Львів: Євросвіт, 2001. – 668 с.
4. Гофманн-Велленгоф Б. Ліхтенеггер Г., Колінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика. / Переклад з англ. мови за ред. Акад. НАНУ Я.С. Яцківа, - К.: Наукова думка, 1996. – 380 с.
5. [Державна геодезична мережа України. http://dgm.gki.com.ua/pasporti-regionalnih-systems](http://dgm.gki.com.ua/pasporti-regionalnih-systems) (дата звернення: 20.10.2024)
6. [Державна геодезична референцна система координат УСК-2000. URL: https://helpiks.org/3-99989.html](https://helpiks.org/3-99989.html) (дата звернення: 21.10.2024)
7. Електронний тахеометр LEICA TCR 405 ULTRA Посібник користувача URL: www.leica-geosystems.com
8. Інструкція з користування електронним тахеометром Sokkia серії SET 610. URL: <http://www.sokkia.net/eu-index.html>
9. Костецька Я. Точність визначення положення пунктів з використанням супутникових систем GPS та ГЛОНАСС / Я. Костецька, Ю. Пішко // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Географія, природокористування та туризм – Ужгород, 2013. – Вип. 1 – С. 62-68.
10. Ланьо О.В. Савчук С.Г. Дослідження точності RTK-вимірювань у мережі референцних станцій. *Вісник геодезії та картографії*. 2012. № 4 (79). С. 8-13.
11. Лук'яненко М. Кривовяз А., Орел О. Можливості використання супутникової апаратури вітчизняного виробника в геодезичних роботах. *Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва*. Львів, 2001. С. 74-78.

12.Навігаційно-геодезичний центр офіційний дистриб'ютор Leica Geosystems в Україні. [Електронний ресурс]: – Режим доступу : <http://ngc.com.ua/>

13.Островський А. Л., Мороз О. І., Тарнавський В. Л. Геодезія : [підручник.] – Ч. 2. / – Львів : Вид-во нац. Ун-ту "Львівська політехніка", 2007.

14.Пішко Ю.Р. Актуалізація параметрів методики відносних супутникових спостережень для створення опорних геодезичних мереж: дис. ... канд. тех. наук: 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія / Пішко Юлія Романівна; Львів. НУ «Львівська політехніка», 2015. – 207 с.

15.Порицький Г. О., Новак Б. І., Рафальська Л. П. Геодезія: підручник /– К.: Арістей, 2007.

16. Про затвердження *Інструкції з Топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500* (ГКНТА-2.04-02-97) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0393-98

17. Про затвердження Порядку використання Державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000 при здійсненні робіт із землеустрою : наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України від 02.12.2016 р. №509. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z1646-16> (дата звернення: 10.11.2021)

18. Прокоф'єв Ф. І. Охорона праці в геодезії і картографії. М.: - Недра, 1987.

19.Рій І.Ф., Бочко О. І., Біда О.Ю. Електронні геодезичні прилади: навч. пос. І.Ф. Рій, О. І. Бочко, О.Ю. Біда – Львів: «ГАЛИЧ-ПРЕС», 2021. – 336с.: іл.

20. Савчук С.Г. Проблемні питання під час використання сучасних супутникових технологій визначення координат. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. — Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка». — 2007. — Вип. 69. — С. 20 – 33.

21. Третяк К. Р. До питання надійності активних моніторингових геодезичних мереж / К. Р. Третяк, І. Р. Савчин // *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. – 2013– Вип. 77. – С. 122-126.

22.Цюпак І.М. Точність визначення координат пунктів і довжин ліній за

сесіями GPS-спостережень різної тривалості *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Львів: Видавництво Львівської політехніки. - 2012. - Вип. I (23).-С. 57-59.

23.Черняга П.Г. Бялик І.М., Янчук Р.М.. Супутникова геодезія. Навч. посібник, 2-ге вид., без змін – Рівне: НУВГП, 2014. – 222 с.

24.Шевченко Т. Г. Мороз О .І., Тревого І. С Геодезичні прилади : [підручник] / за ред. Т. Г. Шевченка. – Львів : Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2006. – 464 с.

25.Scripps Orbit and Permanent Array Center [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.sopac.ucsd.edu>.

26.Trimble Geomatics office. User Guide /Trimble Navigation Ltd. – 2001. – 113 р.