

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет "Львівська політехніка"

На правах рукопису

Пішко Юлія Романівна

УДК 528.2

**АКТУАЛІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ МЕТОДИКИ ВІДНОСНИХ  
СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ  
СТВОРЕННЯ ОПОРНИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ**

05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник:  
доктор технічних наук, професор  
Костецька Яромира Михайлівна

Львів – 2015

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>РОЗДІЛ 1. КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ І НАУКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ</b> .....	13
1.1. Джереда помилок GNNS .....	13
1.2. Основні параметри методики супутникових спостережень для створення геодезичних мереж із застосуванням ГНСС .....	26
1.3. Визначення точності довжин векторів, отриманих з супутникових спостережень.....	33
1.4. Залежність точності положення пунктів супутникових мереж від тривалості спостережень та віддалей між приймачами .....	41
1.5. Вплив різних показників методики супутникових спостережень на точність довжин векторів та положення пунктів супутникових мереж .....	53
1.5.1. Вплив типу ефемерид на точність супутникових визначень.....	53
1.5.2. Вплив кута відсічки на точність визначення положення пунктів.....	55
1.5.3. Вплив спільного використання сигналів супутників систем GPS і ГЛОНАСС на точність визначення довжини векторів та положення пунктів ...	57
1.6. Обґрунтування поставлених у дисертаційній роботі завдань .....	60
<b>ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ</b> .....	63
<b>РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ДОВЖИН ВЕКТОРІВ ТА ПОЛОЖЕННЯ ПУНКТІВ В МЕРЕЖАХ, СТВОРЕНИХ З ДОПОМОГОЮ ГНСС</b> .....	64
2.1. Залежність точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень та відстані між одночасно працюючими приймачами.....	64
2.2. Уточнення функціональної залежності точності визначення довжин векторів за результатами спостережень ГНСС-приймачами .....	71
2.2.1. Характеристика мереж та методика опрацювання даних .....	71
2.2.2. Порівняльний аналіз залежностей точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень та довжин векторів .....	76

2.2.3. Виведення формул залежності точності визначення довжин векторів від тривалості сеансів спостережень та довжин векторів .....	85
2.3. Встановлення залежності точності визначення положення пунктів від тривалості сеансів спостережень, довжин векторів та кількості векторів, які сходяться на пункті .....	97
<b>ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ</b> .....	115
<b>РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ НА ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ПУНКТІВ КУТА ВІДСІЧКИ, ТИПУ ЕФЕМЕРИД, СПІЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ СИГНАЛІВ СУПУТНИКІВ GPS ТА ГЛОНАСС</b> .....	117
3.1. Порівняння точності положення пунктів, визначених використовуючи системи NAVSTAR GPS та ГЛОНАСС .....	117
3.2. Дослідження залежності точності визначення координат пунктів від кута відсічки в мережах, створюваних з допомогою систем GPS і ГЛОНАСС .....	128
3.3. Дослідження залежності точності визначення положення пунктів від типу ефемерид .....	145
<b>ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ</b> .....	162
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	164
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	166
Додаток А .....	183
Додаток Б.....	195
Додаток В .....	205

## ВСТУП

Останні десятиріччя розвитку геодезії характеризуються не тільки підвищенням рівня точності традиційних методів вимірювань, але і постановкою та вирішенням достатньо широкого спектру нових задач з використанням супутникових технологій. Ці технології, порівнюючи з наземними геодезичними методами, мають ряд переваг з точки зору забезпечення точності, швидкості та зручності виконання вимірювань та їх економічної ефективності. Перш за все, вони дають змогу з високою точністю та оперативністю визначати координати пунктів, які можуть розташовуватися на значних віддальх один відносно одного і при цьому не потрібна взаємна видимість між пунктами. Крім того, супутникові методи характеризуються простотою та високим рівнем автоматизації робіт. Все це сприяло швидкому впровадженню супутникових технологій у вирішення задач геодезії, зокрема, створення та реконструкції державних, інженерно-геодезичних мереж і мереж, які використовуються в геодинаміці та в наукових дослідженнях інших галузей. Однак, для забезпечення виконання такими мережами їхніх основних функцій, необхідно методику їх створення постійно вдосконалювати та оновлювати відповідно до сучасного стану супутникових технологій.

**Актуальність теми.** В наш час для розв'язання широкого спектру інженерно-геодезичних задач, зокрема, створення та реконструкції державних, інженерно-геодезичних мереж, мереж, які використовуються в геодинаміці та в наукових дослідженнях інших галузей, застосовуються технології, які пов'язані з використанням глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС).

За останні роки відбулись істотні зміни в такій глобальній навігаційній супутниковій системі, як NAVSTAR GPS: збільшилась кількість функціонуючих супутників, суттєво підвищилась стабільність частоти генераторів супутників, використовуються нові алгоритми вирішення багатозначності фазових вимірювань, зросла кількість наземних станцій стеження і т.п. Це збільшило кількість інформації для визначення координат пунктів, підвищило точність

часової синхронізації та точність прогнозування ефемерид супутників, а також точність остаточних ефемерид.

Крім системи GPS функціонує система ГЛОНАСС. Активно створюються і інші системи, зокрема, Galileo і Compass. І вже досить розповсюдженими є двосистемні і багатосистемні приймачі, які можуть одночасно приймати сигнали супутників двох або і більше систем. Оскільки спільне використання GPS та ГЛОНАСС є одним з перспективних шляхів розвитку ГНСС, то актуальним є питання впливу на точність визначення положення пунктів супутникових мереж, використання сигналів супутників цих двох функціонуючих систем.

Незважаючи на широке використання ГНСС для створення геодезичних мереж, до цього часу не розроблена методика встановлення потрібної тривалості сеансів спостережень, яка забезпечить необхідну точність визначення положення пунктів. Також важливим є регламентування і інших параметрів, таких як: типи ефемерид, які використовують при опрацюванні результатів спостережень, обмеження висоти розташування супутників над горизонтом (кут відсічки).

Вплив різних факторів на точність визначення положення приймачів досліджувало багато вчених як вітчизняних, так і закордонних. Це, насамперед, К. Третяк, Ф. Заблоцький, С. Савчук, Я. Костецька, І. Тревого, П. Баран, І. Цюпак, П. Черняга, О. Хода та зарубіжні вчені А. Генике, Г. Побединский, К. Антонович, Е. Ключин, G. Seeber, B. Hofmann-Wellenhof, J. Śledzinski, J. Januszewski, J. Lamparski, C. Specht, T. Soler, P. Psimoulis, P. Häkli, A. Leick, H. Lichtenegger, J. Collins та інші.

Дисертаційна робота присвячена низці актуальних питань, а саме: встановленню тривалості сеансів спостережень ще на стадії проектування мереж, зокрема встановленню залежності точності визначення довжин векторів від віддалі між одночасно працюючими приймачами і від тривалості сеансів спостережень, а також дослідженню точності визначення положення пунктів геодезичних мереж, створених із застосуванням ГНСС. Вирішення цих питань

дасть змогу осучаснити методикау та оптимізувати процес створення геодезичних мереж з допомогою ГНСС.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку кафедри інженерної геодезії Національного університету "Львівська політехніка" "Модернізація технологій інженерно-геодезичних робіт та геодезичний моніторинг інженерних споруд та геодинамічних явищ", одним із розділів якого є "Модернізація методики створення опорних геодезичних мереж".

Автор брала участь у виконанні наукової теми кафедри інженерної геодезії Національного університету "Львівська політехніка" "Вдосконалення технології виконання інженерно-геодезичних робіт та моніторинг геодинамічних явищ і споруд" (№ ДР 0114U005458). Ці дослідження відповідають положенням Постанови Кабінету Міністрів України № 646 від 7 серпня 2013 р. "Деякі питання реалізації частини першої статті 12 Закону України "Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність".

**Мета і завдання дослідження.** Основною метою дослідження є: отримання формул для оцінки точності довжин векторів та положення пунктів геодезичних мереж, створених з допомогою ГНСС, які дадуть змогу визначати тривалість сеансів спостережень на стадії проектування мереж; дослідити вплив розвитку ГНСС за останні роки на точність результатів супутникових спостережень.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

- дослідити залежність точності визначення довжин векторів від тривалості сеансів спостережень, віддалі між одночасно працюючими приймачами та типу приймачів і встановити функціональні залежності між цими параметрами.
- дослідити залежність точності визначення положення пунктів мереж з різними довжинами сторін від тривалості сеансів спостережень та кількості векторів, що сходяться на пункті. В результаті отримати формули визначення СКП положення пунктів супутникових мереж, враховуючи вказані фактори.

- дослідити вплив на точність супутникових мереж при різній тривалості сеансів спостережень:

- спільного використання супутників двох систем GPS та ГЛОНАСС;
- зміни значення кута відсічки при спостереженнях дво- і одночастотними приймачами, які приймають сигнали супутників тільки системи GPS та супутників двох систем GPS та ГЛОНАСС;

- типу ефемерид (бортові, остаточні, швидкі та ін.), які стали доступними в наш час для опрацювання супутникових спостережень.

**Об'єкт та предмет дослідження.** Об'єктом дослідження є вектори та мережі, створені із застосуванням відносних супутникових спостережень.

Предметом дослідження є методика відносних супутникових спостережень дво- і одночастотними приймачами, враховуючи теперішній стан розвитку ГНСС.

Виконані дослідження відповідають паспорту спеціальності 05.24.01 Геодезія, фотограмметрія і картографія, а саме вони відносяться до пункту "Основні геодезичні роботи на суходолі – засоби і методи виконання вимірів".

**Методи дослідження.** Проведені дослідження ґрунтуються на опрацюванні результатів супутникових спостережень, отриманих на перманентних станціях. При цьому використані теорії похибок вимірювань, математичного опрацювання геодезичних вимірів і мереж, теорію математичної статистики та точні методи апроксимації. Аналіз отриманих результатів дослідження послужив обґрунтуванням висновків та розробки рекомендацій для їх використання в практичній діяльності геодезичних підприємств.

**Наукова новизна одержаних результатів** дисертаційної роботи полягає в тому що:

- встановлені нові функціональні залежності точності визначення довжин векторів від тривалості сеансів спостережень дво- та одночастотними приймачами та віддалі між одночасно працюючими приймачами, які дадуть змогу визначати СКП довжин векторів зі значно вищою точністю, порівняно з

формулами, отриманими раніше іншими авторами, а також відповідають сучасному стану супутникових систем.

- вперше при дослідженні точності визначення положення пунктів розглядається сукупність таких параметрів, як тривалість сеансів спостережень, довжини та кількість векторів, які сходяться на пункті, що оцінюється. За результатами дослідження виведені формули СКП положення пунктів супутникових мереж.

- обґрунтовано ефективність спільного використання сигналів супутників двох систем GPS та ГЛОНАСС при зменшенні тривалості сеансів спостережень.

- встановлено такі параметри при визначенні координат пунктів, враховуючи сучасний стан супутникових технологій, як:

- оптимальне значення кута відсічки при використанні супутників двох систем та різній тривалості спостережень дво- та одночастотними приймачами;

- типи ефемерид для опрацювання результатів спостережень різної тривалості як дво-, так і односистемними приймачами у мережах з різним діапазоном довжин векторів. Вперше встановлено, що при постопрацюванні результатів спостережень супутників двох систем GPS та ГЛОНАСС, найвищу точність пунктів можна отримати при використанні остаточних ефемерид системи GPS і бортових ефемерид системи ГЛОНАСС.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що отримано функціональні залежності точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень та віддалей між одночасно працюючими приймачами, а також залежності точності визначення положення пунктів мереж від тривалості сеансів, довжин та кількості векторів, що сходяться на пункті, який оцінюється. Вони дають змогу при проектуванні геодезичних мереж встановлювати потрібну тривалість сеансів супутникових спостережень для досягнення заданої точності мереж, тобто такої, яка вимагається нормативними документами або замовником.



Підтверджена доцільність використання сигналів супутників двох систем при тривалості сеансів спостережень 3 год і менше для підвищення точності визначення положення пунктів.

Встановлено оптимальні значення кута відсічки при виконанні сеансів спостережень різної тривалості дво- і односистемними дво- та одночастотними приймачами, а також типи ефемерид, які доцільно використовувати опрацьовуючи результати спостережень, отримані дво- і односистемними приймачами.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у ДП "Закарпатський геодезичний центр" для створення опорних геодезичних мереж із застосуванням глобальних супутникових систем.

Отримані нами функціональні залежності точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень та віддалей між одночасно працюючими приймачами впроваджено у навчальний курс "Технології ГНСС в інженерній геодезії" для студентів стаціонарної та заочної форм навчання освітньо-кваліфікаційного рівня "Магістр" спеціальності 8.08010101 "Геодезія" [12].

#### **Основні положення, що виносяться на захист:**

- формули залежності точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень та віддалей між одночасно працюючими двосистемними як одно-, так і двочастотними приймачами;
- функціональні залежності точності визначення положення пунктів в мережах від тривалості спостережень двосистемними двочастотними приймачами, довжин та кількості векторів, що сходяться на пункті, який оцінюється;
- вибір параметрів методики відносних статичних спостережень та опрацювання отриманих результатів, а саме: тип приймача (дво- чи односистемний), кут відсічки, тип ефемерид.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати досліджень дисертаційної роботи опубліковані автором у одноосібній статті [5] і у десяти статтях у співавторстві [1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

В статтях автору дисертації належать опрацювання сеансів супутникових спостережень різної тривалості, а також:

- для одно- і двочастотних приймачів встановлення функціональних залежностей СКП довжин векторів від тривалості спостережень та віддалі між приймачами [3, 5, 8, 10].
- аналіз отриманих результатів для з'ясування впливу зміни тривалості сеансів спостережень, довжин векторів на точність планових координат пунктів у супутникових мережах [4].
- аналіз впливу використання сигналів супутників систем NAVSTAR GPS і ГЛОНАСС на точність визначення положення пунктів супутникових мереж [7, 9, 11].
- аналіз впливу використаних типів ефемерид при опрацюванні результатів спостережень на точність визначення положення пунктів супутникових мереж, в тому числі тих, які стали доступними тільки в останні роки [2].
- аналіз впливу зміни кута відсічки на точність визначення положення пунктів супутникових мереж при різній тривалості спостережень приймачами, які приймають сигнали тільки системи GPS та разом двох систем GPS і ГЛОНАСС [1, 6].

**Апробація результатів дослідження.** Основні теоретичні положення та експериментальні результати дисертаційної роботи апробовані на:

- Всеукраїнському семінарі "GNSS/GPS-методи в інженерній геодезії, геомоніторингу, кадастрі та землеустрої" (Україна, Київ, 2010);
- V Міжнародній науково-практичній конференції "Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні" (Україна, Ужгород, 2010);
- 17-й Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва" Геофорум – 2012 (Україна, Львів-Яворів);

- IV Міжнародній науковій конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Геодезія, архітектура та будівництво 2011" (GAC-2011) (Україна, Львів);
- VI Міжнародній науково-практичній конференції "Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні" (Україна, Ужгород, 2012);
- 18-й Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва" Геофорум – 2013 (Україна, Львів-Яворів);
- 19-й Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва" Геофорум – 2014 (Україна, Львів-Яворів);
- Всеукраїнській науково-практичній конференції "Геодезія. Землеустрій. Природокористування: присвяченій пам'яті П.Г. Черняги" (Україна, Рівне, 2014);
- VII Міжнародній науково-практичній конференції "Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні" (Україна, Ужгород, 2014);
- Науково-методичних семінарах кафедри інженерної геодезії.

**Публікації.** Результати досліджень за темою дисертації містяться в 11 публікаціях, із них п'ять статей (у тому числі одна одноосібна [5] та одна [1] в наукометричному виданні) у фахових виданнях, затверджених ВАК України [2, 3, 4]. Одна стаття [6] у збірнику "Известия Национального Университета Архитектуры и Строительства Армении", який за рішенням ВАК Російської Федерації входить у перелік періодичних видань для публікацій основних результатів дисертаційних робіт. Одна стаття у журналі [7]. Три статті [8, 9, 10] у збірниках матеріалів міжнародних конференцій і одна [11] – у збірнику тез конференції.

**Структура та обсяг дисертації.** Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг

дисертації становить 207 сторінок, із них: 17 сторінок списку використаних джерел із 161 найменуванням, 25 сторінок – додатки, які містять допоміжні матеріали та 5 сторінок з громіздкими таблицями та рисунками. Крім того, робота містить 43 ілюстрації та 48 таблиць.

## РОЗДІЛ 1

### КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ І НАУКОВОЇ ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

В цьому розділі проаналізовані основні джерела помилок та причини їх виникнення, а також можливості їх усунення. Виконаний аналіз нормативних документів, в яких прописані вимоги до проектування супутникових мереж, планування і організації проведення супутникових спостережень та опрацювання отриманих результатів. Опрацьовані наукові публікації, в яких розглянуті питання впливу на точність визначення довжин векторів та положення пунктів різних факторів, а саме: тривалості сеансів спостережень, віддалей між приймачами, типу приймачів, зміни кута відсічки, різних типів ефемерид, тощо.

Все це дасть змогу встановити основні параметри методики супутникових спостережень, які визначають їхню точність, з'ясувати актуальність подальших досліджень, вибрати їх пріоритетні напрямки, сформулювати і обґрунтувати завдання, які необхідно виконати для вирішення поставлених задач.

#### 1.1. Джерела помилок GNSS

Вплив різних джерел помилок простежується від формування сигналу в супутнику до його передачі та опрацювання приймачем (див. табл. 1.1).

*Таблиця 1.1*

Перелік помилок GNSS-спостережень [121]

Тип помилки	Об'єкт впливу			
	Приймач	Супутник	Частота	Псевдовіддаль або несуча фаза
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Помилка годинника приймача	+	-	-	-
Помилка годинника супутника	-	+	-	-
Помилки викликані тропосферою	+	+	-	-
Помилки спричинені іоносферою	+	+	+	+
Багатошляховість	+	+	+	+
Зсув фазового центру антени приймача	+	-	+	-
Зсув фазового центру антени супутника	-	+	+	-

*Продовження таблиці 1.1*

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Помилки приймача (зсуви псевдовіддалі та несучої фази)	+	-	+	+
Помилки супутника (зсуви псевдовіддалі та несучої фази)	-	+	+	+

Джерела помилок можна поділити на три групи, а саме на пов'язані безпосередньо із: супутниками (неточність ходу годинника, зсув антени та зміна її фазового центру); середовищем поширення (вплив тропосфери та іоносфери, багатошляховість); приймачем сигналів (неточність годинника та зміни положення фазового центру антени) (див. табл. 1.2).

*Таблиця 1.2*

## Джерела помилок, що впливають на GPS-сигнали [14, 24]

Джерело	Вплив
Супутник	Похибки орбіт, зміщення фазового центру антени, похибки годинника
Середовище поширення сигналу	Тропосферна та іоносферна рефракції
Приймач	Зміщення фазового центру антени, похибки годинника, багатошляховість поширення сигналу

Крім названих похибок, суттєво впливають на точність вимірів і релятивістські ефекти, а також інші джерела помилок, які пов'язані з точністю супутникових орбіт, переміщеннями приймача внаслідок деформацій земної поверхні, дефектами частоти тощо [14, 24, 120].

В табл. 1.3 наведені джерела помилок та діапазон їх впливу на результати вимірювань [142].

*Таблиця 1.3*

## Джерела ГНСС-помилки [142]

Джерело помилки	Діапазон впливу помилки
Годинник супутника	$\pm 2$ м
Орбіта	$\pm 2,5$ м
Іоносфера	$\pm 5$ м
Тропосфера	$\pm 0,5$ м
Шум приймача	$\pm 0,3$ м
Багатошляховість	$\pm 1$ м

На кодові та фазові псевдовіддалі впливають різноманітні джерела помилок. Це, зокрема, як і систематичні похибки, так і випадкові шуми, спричинені апаратурою або середовищем, через яке проходить сигнал. Необхідно зауважити, що на доплерівські виміри впливають лише швидкості зміни систематичних зсувів [110].

Вплив навколишнього середовища. Сигнали супутників поширюються в тропосфері, тропопаузі, стратосфері та іоносфері. Внаслідок їх взаємодії зі складовими зарядженими частинками і нейтральними атомами і молекулами атмосфери, їх швидкість і напрямок змінюються.

Таке дисперсійне середовище, як іоносфера, зумовлює в сигналі, який проходить крізь неї, випередження по фазі та затримки у псевдовіддалі. Розглядаючи поширення сигналу вздовж прямої траєкторії  $s$ , затримка іоносфери може бути змодельована за допомогою наступних співвідношень [121]:

$$\text{Для несучої фази (випередження): } \delta\Phi_{ION} = -\frac{40,3}{f^2} \int_S N_e ds = -\frac{40,3 \cdot TEC}{f^2}, \quad (1.1)$$

$$\text{Для коду (затримка): } \delta P_{ION} = +\frac{40,3}{f^2} \int_S N_e ds = +\frac{40,3 \cdot TEC}{f^2}, \quad (1.2)$$

де  $N_e$  – щільність електронів, аббревіатура TEC – Total Electron Content (Повна Електронна Концентрація), щільність електронів вздовж траєкторії поширення сигналу або, як вказується в [2] – кількість електронів, які містяться в стовпі з перерізом  $1 \text{ м}^2$ , що простягається від приймача до супутника. Визначається за формулою [24]:

$$TEC = \int_S^R N_e(s) ds. \quad (1.3)$$

У наведених вище співвідношеннях (1.1) та (1.2) TEC визначають вздовж шляху поширення сигналу  $TEC_P$ . Шлях через іоносферу найкоротшим є в напрямку зеніту і тому TEC є найменшим саме у вертикальному напрямку [14, 15, 74, 83, 105, 160]. Для отримання TEC уздовж шляху поширення сигналу, використовують TEC в напрямку зеніту, встановивши певну функцію відображення, яка залежить від зенітного кута траєкторії сигналу [157]:

$$TEC_P = TEC_Z \cdot \text{map}(z). \quad (1.4)$$

Значення ТЕС в напрямку зеніту ( $TEC_Z$ ) може бути встановлене використовуючи певну модель.

Максимальна величина іоносферної затримки становить в зеніті приблизно 30 м, поблизу горизонту майже в три рази більше [2].

Вплив нейтральної атмосфери, яка складається з тропосфери, тропопаузи та стратосфери, називається тропосферною рефракцією. Вплив тропосферної рефракції відчувається до висоти близько 40 км над поверхнею Землі [2]. В літературі нейтральну атмосферу називають тропосферою, хоча, якщо бути точним, термін "тропосфера" не є зовсім правильним, тому що 25% впливу на сигнал, спричиняють гази, що зосереджені вище тропосфери, зокрема в тропопаузі і стратосфері [145].

Нейтральні частинки (атоми і молекули) впливають на електромагнітні сигнали, зменшуючи потужність та спричиняючи їх затримку. Згасання сигналу сягає близько 0,5 дБ, а вплив затримки, приблизно, становить від 2 до 25 м. Похибки змінюються залежно від кута відсічки, оскільки при малих значеннях кута збільшується шлях проходження сигналу крізь тропосферу [121, 145]. Є найменшими в зенітному напрямку і збільшуються, приблизно, пропорційно косекансу кута висоти розташування супутника.

Розрізняють два основні компоненти тропосферної затримки гідростатичну  $\delta_{hyd}$  і вологу складові  $\delta_{wet}$ :

$$\delta_{trop} = \delta_{hyd} + \delta_{wet} \quad (1.5)$$

Приблизно 90% величини тропосферної рефракції складає вплив сухої складової, а решта 10% – вологої [24].

Визначення затримки спрощується за допомогою функції відображення, що характеризується залежністю від кута відсічки [124]. Загальна тропосферна затримка може бути визначена (якщо супутник не в зеніті) [121]:

$$\delta_{trop}(e) = m_{hyd}(e) \cdot \delta_{hyd,Z} + m_{wet}(e) \cdot \delta_{wet,Z}, \quad (1.6)$$

де  $m_{hyd}(e)$  – функція відображення для гідростатичної складової;  $\delta_{wet,Z}$  – зенітна волога затримка;  $m_{wet}(e)$  – функція відображення для вологої складової;  $\delta_{hyd,Z}$  – зенітна гідростатична затримка;  $e$  – кут відсічки.



Тропосферну затримку можна обчислювати, використовуючи значення метеопараметрів, які служать вихідними даними для однієї із багатьох моделей. Таким чином більшу частину тропосферної затримки можна врахувати застосовуючи порівняно прості моделі.

Релятивістські ефекти. Розрізняють нерухому та прискорену систему відліку. Перша пов'язана з центром мас Землі, а друга – з кожним супутником GPS. Тому потрібно враховувати ефекти спеціальної та загальної теорії відносності. Релятивістські ефекти впливають на орбіти супутників, поширення сигналу супутника, годинники як приймача, так і супутника [14, 68].

Вплив чинників, які "підпорядковуються" теорії відносності є досить незначним [112]. Вони можуть мати постійний та періодичний характер. В першому випадку їх вплив корегується шляхом приведення номінальної частоти сигналу супутника до частоти сигналу, прийнятому на станції [144]. Причиною факторів періодичного характеру є припущення про те, що орбіти – колові. Формула відповідної поправки має вигляд [14, 86]:

$$\rho_{rel} = \frac{2}{c} \sqrt{aGM_e} \sin E, \quad (1.7)$$

де –  $a$  велика піввісь,  $e$  – ексцентриситет,  $E$  – ексцентрична аномалія.

Багатошляховість. Антенною приймача можуть прийматися сигнали, які надійшли не тільки безпосередньо з супутника, але і відбиті від навколишніх предметів. Це явище має назву багатошляховості. Вона порушує модуляцію C/A-коду і P-коду і спостереження несучої фази. Хоча прямі і розсіяні сигнали мають однаковий час виходу з супутника, вони надходять до приймача зі зміщенням коду і фази, що зумовлено різницею в довжинах шляхів сигналів від супутника до приймача. Теоретичне максимальне зміщення внаслідок багатошляховості в псевдовіддалі може сягати 150 м для C/A- коду і 15 м для P-коду. А для фази не перевищує близько 1/4 від довжини хвилі, тобто 5-6 см для L1 або L2. Коли геометрія "супутник-приймач" змінюється (і відповідно змінюється кут падіння і відбиття сигналу по відношенню до відбиваючої поверхні), вплив багатошляховості змінюється за синусоїдальним законом і, здебільшого, усереднюється за період від декількох хвилин до чверті години

або більше. Оскільки багатошляховість залежить від геометрії "супутник-приймач", то помилка визначення положення здебільшого повторюється кожної зоряної доби [14].

Сигнали можуть відбиватися поблизу супутника (супутникова багатошляховість) або приймача (багатошляховість приймача).

Для визначення чи передбачення впливу багатошляховості не існує загальної математичної моделі, однак її вплив на вимірювання віддалі можна визначити комбінуванням фазових даних несучої фази для L1 і L2 і псевдовіддалі [2].

В [118] пропонують виявляти та усувати множинність сигналу з допомогою перетворення Фур'є. Крім того, необхідно перевіряти місця встановлення апаратури, уникати металевих споруд та сплетінь металевих проводів [14].

Похибки апаратури супутника і приймача. Похибки виникають в апаратурі супутника або приймача та спричинені електронікою, що опрацьовує чи формує частоти і радіосигнали, крім помилки годинника (неточності в показах годинника по відношенню до єдиного часу GPS). При вимірюваннях виникають певні помилки в GPS- сигналах, як це показано на рис. 1.1 (а саме сигналів, що передавалися супутниками блоку IIR, до модернізації системи). Подібне явище можна також спостерігати в приймачі, коли він генерує сигнал-репліку [121].

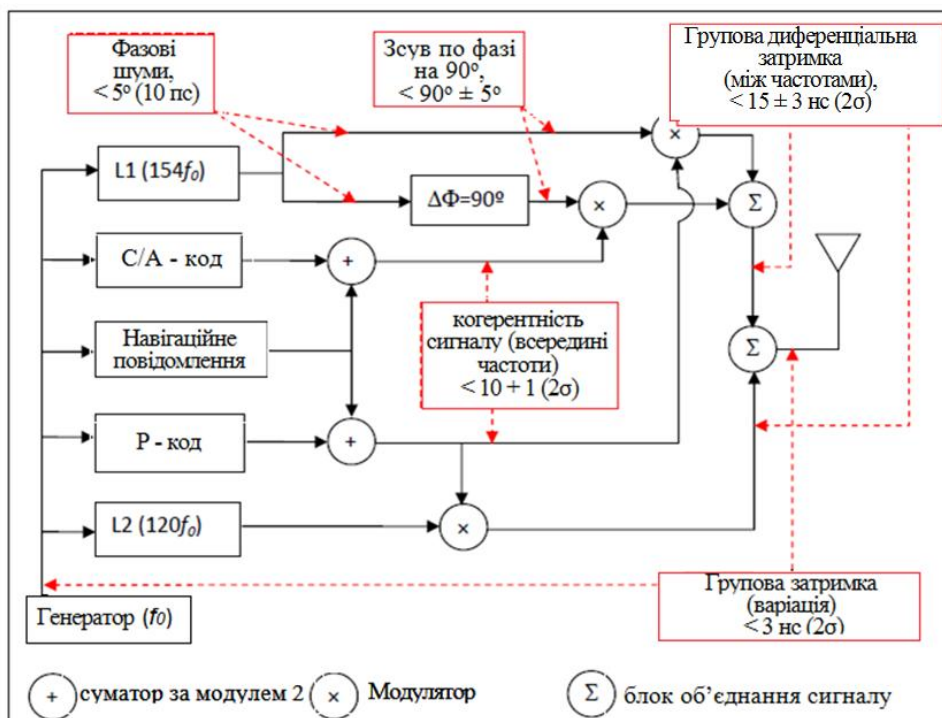


Рис. 1.1. Зсуви в супутниковій апаратурі [109, 154]

Дамо деякі пояснення до рис 1.1, які взяті з [109]:

- фазовий шум: несуча фаза повинна бути визначена з точністю 0,1 радіан, що є еквівалентом  $5^\circ$  або 10 пс для GPS-частот;

- зсув по фазі на  $90^\circ$ : два L1 компоненти модулюються C/A-кодом і P-кодом у фазовій квадратурі (зсув по фазі на  $90^\circ$ ).

- групова затримка: визначається як затримка між вихідним сигналом, який модулюється конкретним супутником (вимірюється від фазового центру антени) і вихідним сигналом цього супутника, вбудованим в носій частоти.

- групова диференціальна затримка (міжчастотна). Абсолютне значення середньої диференціальної затримки не повинно перевищувати 15,0 нс, а відхилення від середнього не повинно перевищувати 3,0 нс (95% ймовірності). Поправки для компонентів групової диференціальної затримки містяться в навігаційному повідомленні та складаються з таких параметрів, як загальна групова затримка (TGD) і міжсигнальна поправка (ISC).

- когерентність сигналу (всередині частоти). Середня різниця між складовими (чіпами) сигналів модульованих на однакових несучих частотах, L1 P – L1 C/A і L2 P – L2 C/A, не повинна перевищувати 10 нс. Варіація часової різниці не повинна перевищувати 1 нс (ймовірність 95%).

При об'єднанні кодових і фазових спостережень похибки апаратури створюють суттєві проблеми. Ті похибки, які не можна усунути, як правило, "об'єднують" з іншими факторами, і після цього їх можна оцінити. Отже, ефект кожної похибки можна певним чином врахувати [68]:

Зміна фазового центру антени. Геометрична відстань між супутником та приймачем визначається між електричними фазовими центрами двох антен (приймача та супутника). В ідеалі фазовий центр повинен співпадати з фізичним центром антени. Крім того, електричний і геометричний центр антени не тільки не завжди точно співпадають, але і мають тенденцію до зміщення з часом [2, 24, 121]. Ця зміна є функцією геометрії розташування супутників. Оскільки величина такого зміщення може бути в межах сантиметра, тому зміна положення фазового центра є досить серйозною проблемою [116].

Необхідно враховувати: положення фазового центру антени супутника, який передає сигнал та положення фазового центру приймача, який приймає сигнал. А також розрізняти: зсув фазового центру (Phase Center Offset, PCO) та варіації фазового центру антени (Phase Center Variation, PCV). PCO антени визначається різницею між референційною точкою (Antenna Reference Point, ARP) та середнім значенням фазового центру антени. В більшості випадків значення PCO наведено в просторових координатах ARP і, як правило, надаються виробником або визначаються третьою стороною [105].

Параметри виправлення фазового центру антени супутника отримують обчисливши різниці між ECEF координатами (система декартових координат з початком відліку в центрі мас Землі) ГНСС-супутників, визначеними за орбітальними параметрами і значенням положення фазового центру антени, від якого сигнал передається на приймач. Оскільки, бортові ефемериди відносяться до фазового центру супутника, то в такому разі корекція непотрібна [109]. Але це не стосується випадку використання IGS-точних ефемерид і часу.

IGS-точні ефемериди визначаються з використанням моделей динамічних сил, тому параметри орбіти супутника відносяться до центру мас супутника. Різниця між центром маси і фазовим центром залежить, головним чином, від конструкції супутника. Для врахування у результатах спостережень цієї різниці користувач повинен знати зміщення фазового центру супутника і брати до уваги напрямок зміщень вектора в просторі, відносно якого супутник рухається навколо Землі (див рис. 1.2).

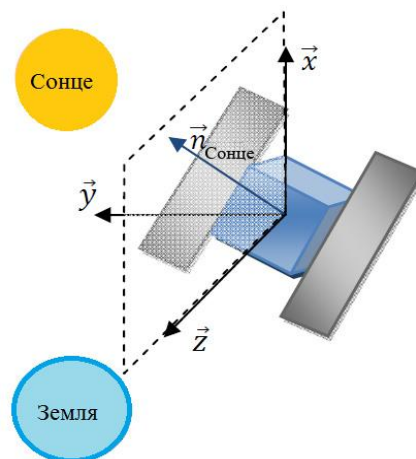


Рис. 1.2. Система координат, Satellite fixed coordinate system [121]

На рисунку показано: вісь  $\vec{z}$  напрямлена в центр мас Землі, збігається з напрямком лінії візування (наведення) антени;  $\vec{y}$  – вісь сонячної панелі, перпендикулярна до вектора напрямленого на Сонце;  $\vec{x}$  – вісь перпендикулярна до осей  $\vec{z}$  та  $\vec{y}$ , формується правобічна система координат;  $\vec{n}_{\text{сонце}}$  – одиничний вектор, напрямлений на Сонце та лежить в площині  $xz$ .

Поправки визначаються, як сума геоцентричного вектора зсуву та геоцентричного вектора положення супутника. Тому необхідно, щоб вектор зсуву антени, вбудованої в тіло супутника, був перетворений в геоцентричний вектор. Алгоритм описаний в [157].

Для усунення впливу варіацій фазових центрів на результати спостережень необхідно, щоб антени були відкаліброваними. З 5 листопада 2006 р. (1400 GPS-тиждень) IGS застосовуються абсолютні моделі фазових центрів антен супутника і приймача [136]. Неврахування параметрів калібрування антен може спричинювати помилки визначення висот пунктів до 10 см [120].

Ще одним важливим фактором, який необхідно брати до уваги, щоб досягнути необхідної точності позиціювання – параметри орбіт супутників. Очевидно (рис. 1.3), що радіальна складова помилки орбіти впливає на визначення псевдовіддалі, і отже, на розташування користувача, суттєвіше, якщо виконувати спостереження абсолютним методом, а не відносним.

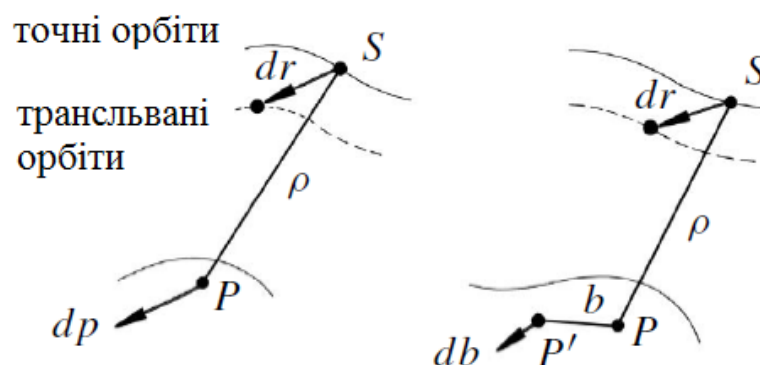


Рис. 1.3. Вплив помилки орбіти: абсолютний метод спостережень (зліва) та відносний (справа) [138]

На рис. 1.3 показано:  $db$  – помилка базисної лінії,  $b$  – довжина базисної лінії,  $\rho$  – відстань між приймачем і супутником,  $dr$  – помилка орбіти,  $P$  – положення пункту,  $dp$  – помилка положення пункту,  $S$  – супутник.

Ефемериди, що передаються супутником в навігаційному повідомленні (бортові ефемериди), приймач отримує безпосередньо в процесі вимірювань. Точність цих ефемерид постійно покращується, на початку 1980-х років для супутників GPS вона складала 20 - 30 м, а сьогодні – 100 см. Така точність, загалом, бортових ефемерид є достатньою при віддалях до декількох десятків кілометрів. Якщо точність ефемерид бортового повідомлення недостатня, то можна скористатися точними ефемеридами. Ефемериди, що передаються із сигналом супутника, наведені у табл. 1.4.

Таблиця 1.4

## Ефемериди, які передаються з супутника [14]

Параметр	Зміст
AODE	Епоха виходу ефемериди
$t_e$	Епоха моменту відліку ефемериди
$\sqrt{a}$ , $e$ , $M_o$ , $\omega_o$ , $i_o$ , $l_o$	Параметри Кеплера на епоху $t_e$
$\Delta n$	Різниця параметрів середнього руху
$i$	Швидкість зміни нахилу орбіти
$\Omega$	Швидкість зміни положення вузла прямого сходження
$C_{uc}$ , $C_{us}$	Коефіцієнти поправок (аргумент перигею)
$C_{rc}$ , $C_{rs}$	Коефіцієнти поправок (геоцентрична відстань)
$C_{ic}$ , $C_{is}$	Коефіцієнти поправок (нахил орбіти)

Ефемеридна інформація містить шість параметрів для відображення згладженого еліпса Кеплера на вибрану епоху, а також параметри деяких вікових та періодичних поправок. Параметри, які наведені в таблиці передаються з супутника кожної години. Останні дев'ять з них враховують вплив збурень через несферичність Землі, прямий припливний ефект, а також тиск сонячного випромінювання [14].

Однією з провідних служб, що надають точні ефемериди, є Міжнародна ГНСС Служба (IGS). IGS накопичує, опрацьовує та зберігає інформацію з більш ніж 300 станцій, що розташовані по всій земній кулі. Близько 120 станцій, класифікуються як глобальні (Global Stations), тому що вони регулярно

моніторяться, принаймні трьома аналітичними центрами. Основні "продукти" IGS складаються з [138]:

- ефемерид і показів годинника, у вигляді таблиць і надаються з 15-ти хвилинним інтервалом протягом кожного дня (у форматі SP3),
- параметрів орієнтації Землі (EOP),
- геоцентричних координат станції і швидкості.

Вплив помилок годинника. Основна частина помилок годинника приймача і супутника виключається формуванням подвійних різниць або при оцінюванні поправки годинника. Помилки, пов'язані з неправильним узгодженням часу квантування сигналів ГНСС, можуть бути визначені на основі доплерівського зсуву сигналів і зазвичай становлять близько 1 мм при помилці в часі 1мкс. Загальний їх вплив несуттєвий, крім випадку, коли приймач неправильно визначає мілісекундну неоднозначність C/A кодових псевдовідстаней. Помилка повинна усуватися в приймачі на етапі первинного опрацювання сигналу[2].

Запізнювання в одночастотних приймачах є однаковим для сигналів, прийнятих одночасно від різних супутників, тому це явище використовується, як додаткова поправка годинника приймача. Багатоканальні приймачі мають міжканальні зсуви, які необхідно ретельно калібрувати. Ця калібровка здебільшого виконується мікропроцесором приймача. Довжини шляхів сигналів різними каналами можуть дещо відрізнитися, тому будуть неоднаковими помилки у вимірах, які виконані на різних каналах в один і той же час. Проте в сучасних приймачах ці зсуви можна відкалібрувати до рівня 0,1 мм або краще [105].

В залежності від необхідної точності, різноманітні помилки можна розглядати суттєвими чи несуттєвими і використовувати різноманітні способи їх врахування. Аналіз табл. 1.5 показує, що найбільш часто застосованими прийомами для врахування різних впливів є методи моделювання похибок і усунення їх за допомогою формування різниць. Для формування різниць необхідними є, перш за все, одночасні спостереження одних і тих наборів

супутників декількома приймачами. Принцип відносного позиціонування отримує перевагу, зокрема через корельовану природу багатьох факторів [2].

Таблиця 1.5

Можливості управління параметрами рівнянь моделей спостережень [2]

Поправки або помилки	Способи врахування				
	А	Б	В	Г	Д
Годинник супутника	+	+			
Початкові фази генераторів		+			
Елементи приведення супутникової антени			+		+
Орбіта супутника	+	+			
Годинник приймача	+	+			
Іоносферна затримка	+	+	+	+	+
Тропосферна затримка	+	+	+	+	+
Неоднозначність фази	+	+			
Втрата рахунку циклів	+	+			+
Елементи приведення антени приймача			+		+
Багатошляховість		+			+
Шум вимірів					+

В таблиці прийняті наступні позначення: А – параметр оцінюється; Б – вплив усувається шляхом формуванням різниць; В – поправка визначається за вимірами; Г – поправка моделюється; Д – не враховується і розглядається як помилка.

Поправки годинника супутника можна отримати з навігаційного повідомлення, а поправки годинника приймача повинні оцінюватися за даними вимірів. Орбіти супутників також є відомими, і помилки в орбітах (разом з немодульованими помилками годинника супутника) мають значний вплив при абсолютному методі спостережень. При виконанні спостережень двома (або більше) приймачами, вплив помилок орбіт і неточностей в поправках годинників супутників зменшується. Відповідно, відносні (або диференціальні) методи визначення положення приймачів, а саме отримані за псевдовіддалями, мають вищу точність, ніж при абсолютному позиціонуванні.

Іоносферна рефракція ігнорується при коротких довжинах векторів. В одностотних спостереженнях вираховується за моделлю з навігаційного повідомлення або її вплив може суттєво зменшуватися при двочастотних вимірюваннях, зокрема і для більш довгих довжин базисних ліній [24]. Однак повністю врахувати вплив іоносфери неможливо. Здебільшого враховується



0,1% від загального впливу, а це помилка в декілька сантиметрів при найбільшому значенні ТЕС [111];

Тропосферна рефракція найбільш проблематична. Інколи її не враховують, але частіше в програмних забезпеченнях вводяться поправки за рефракцію з використанням формул Хопфілд, Саастамойнена, Блека та ін. Крім того, використовуються моделі стандартної атмосфери та визначаються метеопараметри.

Формування різниць між супутниками і між приймачами ефективно усуває всі зсуви, зумовлені помилками генераторів годинників і, в той же час, значно зменшує і інші похибки (за винятком неоднозначності фаз). Неоднозначність в рівнянні моделі фази може бути усунута формуванням різниць між епохами (потрійних різниць). Крім того, її можна враховувати шляхом оцінювання неоднозначності в попередньому "плаваючому" рішенні, а далі визначається найбільш ймовірне ціле значення в наступному рішенні з "фіксованою неоднозначністю".

Вплив різних джерел помилок на результати вимірювань, які отримані використовуючи супутникові технології, можна зменшити чи навіть повністю усунути дотримуючись певних норм та правил, значення має також методика виконання спостережень [69]. Різниці між параметрами, отриманими різними приймачами, усувають зсуви, джерелом яких є один з приймачів, а в різницях, отриманими за результатами спостережень різних супутників є відсутні похибки, зумовлені певним супутником. Отже, обчислені подвійні різниці псевдовідстаней суттєво зменшують вплив систематичних помилок, причиною яких є супутник та приймач. [14]. Підвищити точність результатів супутникових спостережень можна, зокрема, шляхом певного комбінування спостережуваних величин, наприклад, змінювати тривалість спостережень, виконувати спостереження в різні проміжки часу при іншій конфігурації та кількості супутників, застосовувати багаточастотні приймачі, при опрацюванні використовувати точні ефемериди тощо. Усувати чи зменшувати вплив помилок можливо також, створюючи певні їх моделі.

Досить важливою є і якість апаратури, яка використовується не тільки користувачем, але і працює в супутниковому сегменті та сегменті управління.

Отже, всі процеси, які пов'язані з формуванням передачею супутниками сигналів та опрацюванням їх приймачами, піддаються впливу багатьох факторів. Вплив цих чинників як сумарний, так і кожного зокрема визначити та врахувати є досить складно, тому здебільшого зосереджують свою увагу та досліджують ті, дія яких на точність супутникових визначень є найбільш суттєвою. Загальні вимоги до виконання супутникових спостережень, які обґрунтовані інструкціями, враховують: типи супутникових приймачів, їх кількість, тривалість сеансів спостережень, кількість супутників, яка одночасно спостерігається, значення кута відсічки, дискретність супутникових сигналів, кількість незалежних центрувань антени на пункті, кількість повторних вимірювань висоти антени під час сеансу спостережень та ін. [23]. Деякі з цих параметрів і використані для досліджень в дисертаційній роботі.

## **1.2. Основні параметри методики супутникових спостережень для створення геодезичних мереж із застосуванням ГНСС**

Методика виконання геодезичних робіт при створенні планових опорних геодезичних мереж формувалася протягом тривалого часу і включає в себе принципові положення, яких потрібно неухильно дотримуватися при організації геодезичних вимірювань. Це стосується і робіт пов'язаних з використанням супутникових технологій.

Всебічно опрацьована і обґрунтована методика – передумова успішного виконання будь-якого завдання. Сукупність певних методів і формують методику виконання робіт. Однак, при вирішенні будь-якої проблеми замало скласти перелік методів, необхідно їх сконструювати й звести в струнку систему, визначити послідовність їх застосування [36, 60]. Потрібно зауважити, що розглядаючи питання методики створення геодезичних мереж за допомогою супутникових технологій, будемо мати справу з відносними статичними методами виконання вимірювань.

Основні вимоги щодо виконання ГНСС-спостережень зведені у нормативно-правові акти, інструкції та іншу технічну документацію. Дотримання певних норм та правил дозволяє зводити до мінімуму неминучі помилки, не допускати накопичення похибок у процесі вимірювань і тим самим підвищувати точність визначення шуканих параметрів.

У 80-х рр. геодезисти багатьох країн почали робити спроби використання системи NAVSTAR GPS для створення планових опорних геодезичних мереж, які були досить успішними [1]. І вже у 90-х рр. були розроблені певні рекомендації та нормативні документи, які передбачали застосування ГНСС для створення планових геодезичних мереж, в тому числі мереж, пункти яких служать для розповсюдження на всю територію країни єдиної системи координат. Останні стали основою для топографічного знімання усіх масштабів території країни, що задовольняє потреби господарства держави, її оборони, розвитку науки та потреб цивільного населення. В Україні такі мережі названо державними геодезичними мережами (ДГМ).

У всіх країнах геодезичні мережі складаються із взаємозв'язаних мереж декількох класів. Нормативні документи встановлюють вимоги до точності та щільності пунктів мереж кожного класу, схемою їх побудови та фігур, з яких вони складаються тощо.

Для створення високоточних геодезичних мереж використовують найточніший метод супутникових спостережень – відносний статичний. В нормативній літературі багатьох країн (Україна [22, 23], Росія [8, 21, 39, 45], Білорусія [13], Польща [126, 156, 159], Великобританія [100], США [89, 92, 99, 151], Австралія [97, 98], Гонконг [64], Єгипет [128] та ін.) регламентують основні параметри методики супутникових спостережень. Загальноприйнятими у світовій практиці є такі:

- тип приймача, яким потрібно виконувати спостереження;
- тривалість сеансів спостережень;
- мінімальна кількість супутників, сигнали яких одночасно повинні приймати приймачі;

- максимальне допустиме значення GDOP;
- мінімальна висота супутників над горизонтом;
- інтервал реєстрації супутникових сигналів.

Діапазон віддалей між приймачами в кожному класі мережі залежить від прийнятої щільності її пунктів.

В табл. 1.6 наведені нормативні значення параметрів методики супутникових спостережень, які діють в Україні. Таблиця складена використовуючи "Інструкцію про побудову ДГМ з використанням СРНС" [22].

Таблиця 1.6

Основні параметри методики відносних статичних спостережень  
при створенні державних мереж України

№ п.п	Найменування вимоги	Клас мережі				
		1	2		3	
1	2	3	4		5	
1	Довжини сторін, км найдовша найкоротша	150 50	20 5		10 2	
2	Кількість сторін в ході не більше	3	6		6	
3	СКП положення пунктів, мм	> 5	3 - 5		5	
4	Відносна помилка вимірювання сторін, не більше	-	1:300 000		1:200 000	
5	Мінімальна висота супутників над горизонтом, градус	10	15		15	
6	Максимальне GDOP	5	5		5	
7	Дискретність реєстрації сигналів супутників, сек	30	15 при $S > 10$ км 30 при $S < 10$ км		10 при $S > 3$ км 15 при $S < 3$ км	
8	Тип приймача	двочастотний	двочастотний	одночастотний	двочастотний	одночастотний
9	Мінімальна кількість приймачів	4..6	4	5	4	5

Продовження таблиці 1.6

1	2	3	4	5	1	2
10	Мінімальна кількість супутників	5	4	5	4	5
11	Тривалість сеансів спостережень, год.	24 ... 72 (від однієї до трьох діб)	2,5 при $S > 10$ км 0,5 – 1,0 при $S \leq 10$ км	1,0 – 1,5 при $S \leq 10$ км	0,25 – 0,5 при $S$ від 2 до 10 км	0,3 – 1,0 при $S$ від 2 до 10 км

Нормативні документи, зокрема і розглянуті нами (України і інших держав), ставлять вимогу, щоб положення пунктів мереж всіх класів визначалося в єдиній системі координат. З цією метою виконують прив'язку мереж, що створюють, до пунктів вищого класу, кількість яких залежить від класу точності створюваної мережі. Для мереж вищого класу точності рекомендують як вихідні використовувати не менше трьох пунктів [22, 23, 45, 89, 97, 128] або не менше чотирьох [13, 21, 23, 100]. Якщо проектується мережа нижчого класу, де вимоги до точності є менш строгими, деякі інструкції допускають прив'язку до двох вихідних пунктів [92, 100, 151]. Допустима відстань від нових пунктів, що прив'язуються до вихідних залежить також від класу створюваної мережі. В більшості випадків максимальне її значення є близьким до допустимої найдовшої довжини сторони в запроектованій мережі.

Прив'язку пунктів супутникових мереж до пунктів ДГМ виконують статичним методом, не менше як двома сеансами двочастотними приймачами. Тільки у разі, якщо пункти віддалені від пунктів ДГМ не більше ніж на 10 км, то прив'язку дозволяється виконувати одночастотними приймачами [23].

Структура мережі, принцип та порядок її побудови також чітко прописані в нормативних документах. Рекомендується мережі будувати із замкнених геометричних фігур (полігонів) [21, 22, 100]. Для підвищення точності отриманих результатів мережа повинна бути геометрично збалансованою, кожен вектор визначається двома незалежними сеансами зі зміною сузір'я супутників [100]. В свою чергу полігони складаються мінімум з трьох базових ліній [89, 92] та максимум з шести [89] або десяти [92, 128]. Найменша кількість приймачів, які одночасно виконують вимірювання – три [100, 128], а у

[23] вказується, що їх кількість може сягати шести для мереж найвищого класу точності та чотирьох для нижчих класів.

Таким чином, мережа формуватиметься з трикутників, кожен з яких складатиметься з двох незалежних та одного залежного вектора (спільний для двох послідовних сеансів) [89, 100]. Мінімальний відсоток повторюваних незалежних векторів 5% від їх загальної кількості у мережі [89]. У [127] мінімальна кількість незалежних векторів в полігоні визначається відповідно до класу мережі, так у мережах вищого класу точності таких векторів у полігонах не повинно бути менше трьох, а в мережах нижчого класу – не менше двох.

Проектуючи мережу з трикутників необхідно, щоб вони були близькі до рівнокутних, в мережі мінімальне значення кута в трикутнику може бути рівним  $20^\circ$  [45]. Відношення найдовшої та найкоротшої лінії в мережі не більше 5 [128].

В інструктивних матеріалах [89, 98, 128, 159] тривалість сеансів визначається відповідно до класу мережі та залежно від довжин векторів [45, 92, 99, 100, 151]. В [22] при встановленні тривалості спостережень враховується також мінімальна кількість супутників, що одночасно спостерігається. Якщо спостереження виконувалися в несприятливих умовах, внаслідок чого точність супутникових визначень погіршувалася, то в такому разі вимірювання повторюють, при іншій конфігурації супутників.

Вибір одно- чи двочастотних приймачів залежить від віддалей між пунктами та необхідної точності визначення положення пунктів. Згідно з [22, 127] виконувати GPS-спостереження одночастотними приймачами дозволяється у геодезичних мережах згущення, довжини векторів яких не перевищують 30 км. В інших нормативних матеріалах довжини векторів є значно коротшими. Так в [45, 99, 151] вказується, що приймачі даного типу використовують, якщо вектори не є довші 10-ти км, а в [100] нижня межа довжин векторів становить 5 км. Відповідно до [8, 92, 98] діапазон довжин векторів дещо зростає і максимальне значення становить 15 км, а згідно [93] до 20 км. При віддаль між пунктами 9 миль (14,5 км) і більше використовують двочастотні приймачі. У випадку підвищення сонячної активності двочастотні

приймачі використовують, якщо довжини векторів перевищують 6 миль (9,6 км) [89]. Варто нагадати, що в першу чергу, звертають увагу на те, чи дозволяють технічні характеристики одночастотних приймачів досягти необхідної точності вказаної для того чи іншого класу мережі.

Для досягнення необхідної точності супутникових визначень, виконуючи спостереження, потрібно дотримуватися, як вже вказувалося вище, встановлених значень таких параметрів, як: найменша кількість супутників, дискретність супутникових сигналів, мінімальна висота супутників над горизонтом, параметри геометричної конфігурації супутників (здебільшого GDOP та PDOP).

Для розрахунку зміни параметра GDOP використовують альманах ефемерид супутників за датою не пізніше двох тижнів для кожного пункту, величина даного параметру повинна бути меншою 5-ти одиниць [23, 92]. В деяких інструктивних матеріалах регламентується максимально допустиме значення критерію погіршення точності визначення просторового місцеположення, який обумовлений геометрією сузір'я супутників (PDOP). Отже, даний параметр не повинен перевищувати 6 одиниць [99, 126, 151] або 5 [45, 89, 100]. Для досягнення більшої точності максимально допустиме значення показника PDOP має становити – 3 - 5 одиниці [128], якщо ж високої точності не вимагається, то цей показник може зрости до 7 [21] або навіть 10 [127]. Здебільшого в інструкціях значення показника PDOP або GDOP задається, як стандартне для всіх класів мереж. Досить рідко задається значення показника VDOP, який також не повинен бути більшим 6 одиниць [99].

Як вказувалося вище, важливе значення також має мінімальна кількість супутників, що одночасно спостерігається та їх висота над горизонтом. При виконанні спостережень статичним методом супутників не повинно бути менше чотирьох [23, 92, 126, 127, 128]. Якщо вимагається виконувати вимірювання з більшою точністю, то необхідно не менше п'яти супутників [23, 99, 127, 151] або шість [100].

Здебільшого кут відсічки встановлюється відповідно до класу створюваної мережі та необхідної точності вимірювань, однак трапляються випадки, коли

даний показник є незмінним. Однією з причин встановлення певного значення висоти розташування супутників над горизонтом є також необхідність зменшення негативного впливу об'єктів, що розташовані поруч. Таким чином, висота положення супутників над горизонтом не повинна бути меншою  $10^\circ$  [89, 93, 126],  $12^\circ$  [99] або  $15^\circ$  [92, 100, 127, 128]. Нормативні документи Австралії вимагають встановлення кута відсічки рівним  $0^\circ$  при створенні мереж 1-го класу,  $7^\circ$  – мереж 2 і 3-го класу,  $15^\circ$  – 4 і 5-го. Виконуючи вимірювання для розвитку опорної геодезичної мережі Австралії кут відсічки рівний (1-й клас, який характеризується найвищою точністю), (2-й та 3-й класи) та (4-й та 5-й класи) [98].

Виконавши спостереження результати вимірювань опрацьовують. Для цього використовують стандартні програми, якщо довжини векторів у мережі не перевищують 20 км [45] або науково-дослідне програмне забезпечення для опрацювання результатів спостережень у мережах 1 класу, в яких довжини векторів є понад 70 км [98] та понад 80 км [100].

Необхідно також зауважити, що використання того чи іншого типу ефемерид (бортові чи точні) є досить важливим чинником, який необхідно враховувати для досягнення необхідної точності супутникових визначень [100]. Особливо, якщо пункти знаходяться на значних віддальх один від одного, тому у мережах вищих класів, де довжини векторів є більші рекомендують використовувати точні ефемериди, здебільшого це мережі вищих класів (найчастіше 1-го класу, рідше 2-го) [89, 100, 128, 151]. В [98] більш детально вказується, який тип ефемерид застосовувати відповідно до класу мережі: при визначенні положення пунктів в мережах 1-го та 2-го класу – остаточні (final), 3 класу – швидкі (rapid), 4-го та 5-го класу – ультра-швидкі (ultra-rapid) або бортові (broadcast) ефемериди.

Нормативні вимоги до параметрів супутникових спостережень при створенні геодезичних мереж дозволяє звести до мінімуму, насамперед, систематичні помилки та не допустити їх нагромадження, тобто практично отримати потрібну точність визначення положення пунктів.



Варто також зауважити, що розглянуті інструктивні матеріали затвержені з 2002 по 2012 рік. Однак більшість діючих нормативних документів базується на досвіді застосування ГНСС у 80-х і 90-х рр., коли використовувалась тільки одна супутникова система – NAVSTAR GPS, модернізація якої тільки розпочиналася. Вже декілька років, крім системи GPS, функціонує система ГЛОНАСС. Сучасні приймачі приймають сигнали супутників обох систем, що збільшує кількість інформації, яку використовують при створенні геодезичних мереж. Тому значення основних параметрів методики супутникових спостережень при створенні високоточних геодезичних мереж потрібно встановити відповідно до сучасних можливостей ГНСС.

Проаналізувавши низку інструкцій та рекомендацій щодо застосування супутникових радіонавігаційних систем можна зробити висновок, що загалом методика та вимоги мають багато спільного. Зокрема, що стосується умов проведення спостереження, то чинники, які необхідно враховувати є стандартними: мінімальна кількість супутників, що одночасно спостерігаються, висота супутників над горизонтом, відсутність перешкод для передачі сигналів, значення параметрів PDOP чи GDOP, інтервал реєстрації супутникових сигналів, кількість приймачів та ін. Крім того, побудова мереж здійснюється за однією методикою, якщо і є розбіжності, то вони незначні і залежать від особливостей побудови мереж в тій чи іншій країні. Основні відмінності стосуються визначення стандартів точності та класифікація мереж відповідно до заданих параметрів.

### **1.3. Визначення точності довжин векторів, отриманих з супутникових спостережень**

Достовірний розрахунок точності результатів ГНСС спостережень має важливе значення для оптимізації технології, мінімізації витрат на побудову та модернізацію геодезичних вимірювань. Аналіз впливу різних факторів на точність визначення координат пунктів, а також пошук залежності точності

параметрів векторів та положення пунктів від цих факторів розглянуто у низці досліджень [5, 6, 25, 54, 55, 70, 129, 139].

Закономірним є те, що проблема визначення координат пунктів з необхідною точністю тісно пов'язана з питанням попереднього розрахунку точності виміру векторів. Однак цілком логічно виникає ще одне питання, якою повинна бути при цьому тривалість спостережень. Найчастіше її встановлюють на підставі досвіду та технічних характеристик приймачів. Інформація про те, як змінюється точність визначення параметрів векторів у разі іншої тривалості сеансів та дії різних факторів, відсутня в технічних описах приймачів.

Як правило, чим більше супутників спостерігається одночасно, тим краща геометрія, що в свою чергу дозволяє скоротити тривалість вимірювань. Коротшою буде тривалість сеансу і при коротких векторах [3].

Вже в одній із перших монографій [14], присвячених ГНСС, яка була опублікована в 1994 р., розглядається питання тривалості сеансів спостережень від довжини векторів. Ця залежність представлена у вигляді таблиці (табл.1.7), у якій вказані тривалості сеансів спостережень для певних діапазонів довжин векторів, визначених одночастотними приймачами.

*Таблиця 1.7*

Тривалість спостережень залежно від довжини базису [14]

Довжина вектора [км]	Тривалість сеансу [хв]
0,1 - 1,0	10 - 30
1,1 - 5,0	30 - 60
5,1 - 10,0	60 - 90
10,1 - 30,0	90 - 120

Використання двочастотних приймачів дозволить суттєво скоротити тривалості сеансів спостережень.

Дана інформація носить суто рекомендаційний характер і може використовуватися лише при плануванні спостережень, оскільки не вказується, з якою точністю будуть визначені довжини векторів у сеансах спостережень такої тривалості. Автори рекомендують провести на території об'єкту спостереження більшої тривалості від вказаних в табл.1.2, опрацювати їх. Після

цього опрацювати тільки частини виконаних спостережень, тобто сформулювати сеанси спостережень меншої тривалості, і проаналізувавши отримані результати, встановити оптимальну тривалість спостережень.

Вирішенням цієї проблеми, а саме залежності точності визначення координат пунктів та параметрів векторів від тривалості спостережень та віддалі між одночасно працюючими приймачами займалося та продовжує займатися досить багато дослідників з метою не тільки встановлення цієї залежності, але і виведення формул для її представлення, які можна було б використовувати при плануванні спостережень.

У [6] використовуючи результати проведеного регресійного аналізу виведені формули залежності точності вимірювання векторів від відстані між одночасно працюючими приймачами ( $S$ ) у статичному режимі та тривалості спостережень ( $t$ ). В цій роботі такі функціональні залежності отримані для двох та одностотних GPS-приймачів. Відомо, що використання двочастотних приймачів дозволяє зменшити вплив іоносфери на точність вимірювань. Цей вплив зростає при збільшенні відстаней між пунктами, тому важливо встановити максимально допустимі довжини векторів, при яких можна використовувати одностотні приймачі, не погіршуючи точності.

У першому випадку рівняння регресії виведене за результатами спостережень двочастотними приймачами і рекомендується використовувати для оцінки точності визначення векторів, довжини яких змінюються від 50 до 500 км. Ця формула має вигляд:

$$m_s = 1,327 S_{\text{км}} + (1,226 - 0,0082 S_{\text{км}}) t_{\text{хв}}, \quad (1.8)$$

де  $S$  – довжина вектора в кілометрах;  $t$  – тривалість сеансу у хвилині;  $m_s$  – похибка вектора у міліметрах.

У другому випадку для одностотних приймачів при довжинах векторів від 1 до 20 км виведена формула:

$$m_s = 3,558 S_{\text{км}} + (0,282 - 0,0188 S_{\text{км}}) t_{\text{хв}}, \quad (1.9)$$

Однак ці рівняння мають деякі недоліки, зокрема в (1.8) при  $S < 149,5$  км коефіцієнт  $t_{\text{хв}}$  стає додатнім, тобто збільшення тривалості сеансу спостережень викликає зростання помилки довжини вектора. Така ж властивість є у формули

(1.9) при  $S < 15$  км. Отже, фактично, формулу (1.8) можна застосовувати для оцінки векторів від 150 до 500 км, а формулу (1.9) – для векторів довжиною від 15 до 20 км.

За дослідженнями двочастотного приймача Leica SR 9500 (для довжин векторів від 1 до 10 км та тривалості спостережень від 10 хв до 2 год), результати якого викладені в [54], виведене рівняння:

$$m_s = (3,90 \pm 2,50) + (2,40 \pm 0,56) L - (0,53 \pm 0,33) L t, \quad (1.10)$$

де  $t$  – тривалість сеансу в годинах,  $L$  – довжина вектора в кілометрах.

Формула (1.10) підтверджує тезу про підвищення точності визначення довжини вектора зі збільшенням тривалості спостережень, хоча, як і формула, так і побудована авторами статті номограма свідчать, що залежність точності виміру векторів від тривалості спостережень є досить слабкою. Більш суттєвою є залежність від довжини вектора.

Результати дослідження залежності точності довжин векторів від тривалості GPS-вимірів та довжин векторів наведені в [55]. В цій роботі, з метою розширення діапазону вище розглянутого дослідження [54] використано результати спостережень за одну добу та сформовано по два сеанси тривалістю 12, 6, 4, 2, 1 та 0,5 год. Встановлені математичні вирази залежності точності визначення складових вимірюваного вектора від його довжини та тривалості спостережень:

$$m_s = e^{\left(\frac{(0,1413 \pm 0,0205)}{t} + (0,5675 \pm 0,0198)\right) * \sqrt{L}}. \quad (1.11)$$

Для векторів довжиною від 10 до 50 км – це змішані лінійно-експоненціальні функції, тобто похибки вимірювання довжин векторів залежно від довжини вектора змінюються за експоненціальним законом, а від тривалості спостережень – за кривою другого порядку. Крім того, встановлено, що максимально ефективна тривалість GPS-спостережень при вимірюванні векторів із довжинами від 10 до 50 км є від 3 до 6 год і ця величина зростає пропорційно довжині вектора. Автори стверджують, що при  $t > 6$  год не досягається "ефективного підвищення точності вимірів". Однак потрібно зазначити, що на нашу думку, отримана в [55] залежність є наближеною, оскільки помилки середніх квадратичних помилок, за якими формула отримана,

були обчислені за формулою:  $m = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n \Delta^2}{n}}$ , де  $n=2$  (тільки два значення  $\Delta$ ), і

$m_m = \frac{m}{\sqrt{2n}} = \frac{m}{2}$  становить 50%. Тому і висновки, зроблені в статті, також є тільки орієнтовними.

В [5] виведена формула:

$$m_s = (5_{mm} + S) \cdot (t_o/t_o)^{1/2}, \quad (1.12)$$

де  $t_o$  – тривалість спостережень (здебільшого 5 - 10 хв), при якій забезпечується однозначність виміру вектора;  $t_i$  – тривалість спостережень вимірювання векторів.

Також в [5] запропонована методика визначення тривалості спостережень залежно від довжини вектора для забезпечення необхідної точності визначення довжин векторів. Вона полягає у відношенні тривалості сеансу спостережень до тривалості спостережень, необхідної для виключення багатозначності, яка має місце при фазовому вимірюванні віддалей до супутників. Такий підхід не є зовсім правильним, оскільки протягом всієї тривалості спостережень виключення багатозначності виконується один раз на початку сеансу і може повторюватись тільки у разі короткочасного переривання зв'язку із супутником. Крім того, час, який потрібний для надійного виключення багатозначності не є сталим, тому що залежить від впливу різних факторів. Отже, можна розглядати цей підхід, як наближений.

У статті [5] наведена номограма призначена для GPS-приймачів типу Trimble 4600 LS і 5700, в яких  $a = 5$  мм і  $b = 1$  ppm, якою доцільно користуватися для планування робіт, якщо  $a/b \neq 5/1$ , то визначені за номограмою величини будуть наближеними.

Питання впливу тривалості GPS-спостережень розглянуто в [29] на векторах довжиною від 2 до 20 км. В роботі використовують результати спостережень за одну добу та сформовано по два сеанси тривалістю 12, 6, 3, 1 години та 30, 10, 5 хвилин. Отримані результати підтверджують наявність

тісної залежності точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень. Крім того, зроблені такі висновки:

- чітка залежність між середніми квадратичними помилками (СКП) довжин векторів та віддаллю між приймачами не простежується;

- при тривалості спостережень більшій ніж 30 хвилин суттєвої різниці в точності для векторів довжиною 2 - 10 км та векторів – 10 - 20 км, немає;

- на векторах довших від 10 км спостереження тривалістю 10 та 5 хвилин дозволяється виконувати тільки тоді, коли немає високих вимог до точності визначення координат пунктів.

У роботі [25] розглянуті питання, які також певним чином стосуються дослідження залежності точності визначення довжин векторів від типу приймача (двочастотний чи одночастотний). Для цього використані результати спостережень на 10 перманентних станціях, виконаних для оновлення державної мережі у Закарпатській та Львівській областях. З них сформовано по два сеанси спостережень дво- та одночастотними приймачами різної тривалості на 24-х векторах, довжиною від 25 до 203 км. Порівнюючи довжини векторів, отриманих за результатами спостережень тривалістю 12 та 1 година двочастотними та одночастотними приймачами з точними їх значеннями, за які взяті параметри векторів, визначені за результатами статичних спостережень на двох частотах тривалістю 24 години з урахуванням точних ефемерид, дійшли висновку, що точність довжин векторів, визначених одночастотними приймачами, є в 2-3 рази нижчою від точності цих величин, отриманих за спостереженнями двочастотними приймачами. Крім того, довжини векторів, одержані за результатами спостережень одночастотними приймачами, містять систематичну помилку, яка має значення близько 1:100000 від довжини вектора.

Дослідженням залежності точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень та довжин векторів займалися також іноземні вчені. Розглянемо їх роботи більш детально:

Дослідження [129], для встановлення мінімальної тривалості відносних статичних GPS спостережень, що дозволить досягти необхідної точності

визначення довжин векторів, було виконане в Греції в 2003 р. Для цього були використані спостереження тривалістю шість діб двома двочастотними GPS-приймачами, встановленими на віддалі один від одного близько 20 м. Інтервал запису результатів спостережень був встановлений 30 секунд, а кут відсічки –  $15^\circ$ . З шестидобових спостережень за допомогою генератора випадкових чисел вибрано по дев'ять сеансів тривалістю 1, 2, 3, 5, 7, 8, 10 годин та 15, 30 хвилин, а також сеанси тривалістю 1, 2, 3 дні. Для кожного набору даних певної тривалості визначені середнє значення довжини лінії та середня квадратична похибка визначення довжини вектора. Крім того, кожна довжина вектора (середнє значення), яка отримана з дев'яти сеансів певної тривалості, порівнювалась з довжиною, визначеною за результатами спостережень протягом шести діб і прийнятою за істинне значення. За середніми та максимальними значеннями різниць побудовані графіки. На рис.1.4 наведений один з графіків, побудований за максимальними різницями між середнім значенням та істинним значенням довжини вектора для кожної тривалості спостережень.

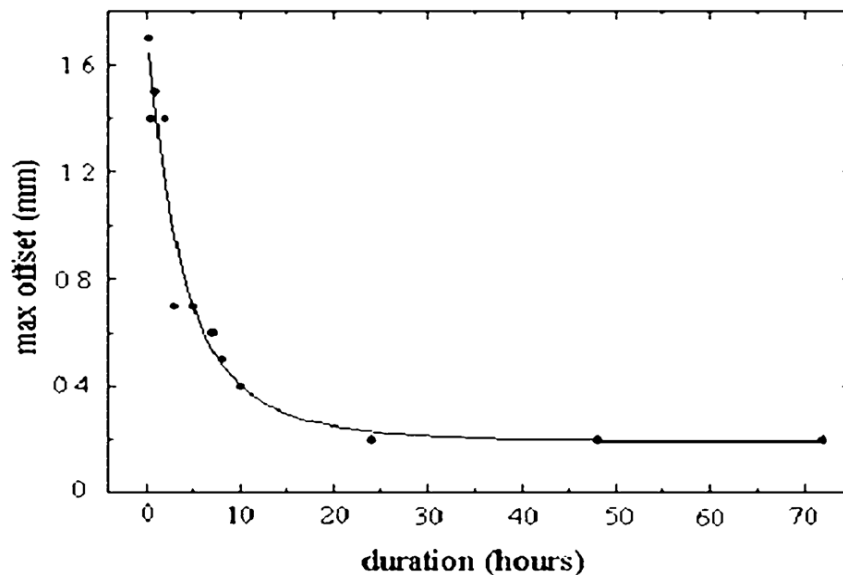


Рис. 1.4. Графік максимальних відхилень (max offset (mm)) довжини вектора визначеного за сеансами різної тривалості (duration (hours)) та його істинного значення [129]

Графік (рис.1.4) показує залежність точності визначення довжини вектора від тривалості спостережень. Встановлено, що найкраще відображає цю

залежність експоненціальна крива. Таким чином, на підставі отриманих результатів, встановлено, що оптимальна тривалість спостережень (для умов Греції) 3 год.

У [139] поставлено питання впливу різних чинників, а саме: тривалості спостережень, довжин векторів та кількості супутників, сигнали яких одночасно приймаються, на точність GPS-спостережень. Розглядаються:

- тривалість спостережень від 30 до 120 хвилин;
- довжини векторів від 1 до 50 км;
- кількість супутників 4, 6, 8.

На рис. 1.5 показано, як змінюється тривалість відносних статичних спостережень від довжин векторів та кількості супутників.

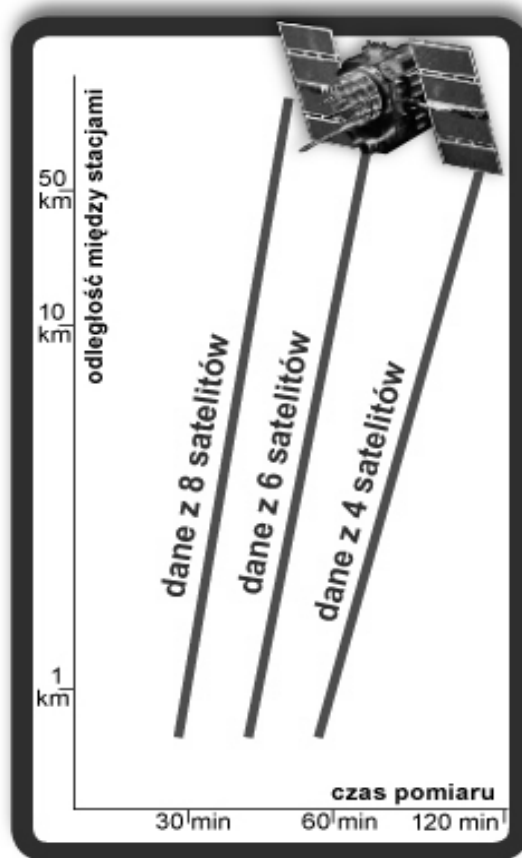


Рис. 1.5. Орієнтовна тривалість GPS-спостережень [139]

Як бачимо з рис. 1.5 тривалість спостережень (czas pomiaru) є найменшою, якщо спостерігається не менше восьми супутників (8 satelitów), а довжини векторів (odległość między stacjami) є найкоротшими. Однак, необхідно зауважити, що даний рисунок дозволяє лише приблизно визначити тривалість



сеансу спостережень при певній кількості супутників та віддалі між приймачами. Також не вказується, якою буде точність визначених довжин векторів.

#### **1.4. Залежність точності положення пунктів супутникових мереж від тривалості спостережень та віддалей між приймачами**

Проблема точності визначення координат пунктів та довжин векторів в геодезичних мережах є досить складною. Вона залежить не тільки від параметрів методики супутникових спостережень та впливу середовища, але і від конфігурації мережі (геометричних фігур, з яких вона побудована), точності і розташування пунктів, до яких прив'язана мережа і т.п. В ході її вирішення виникають нові додаткові питання, які потребують глибокого вивчення та аналізу. Дослідженням цих питань займалися і займаються багато дослідників.

При виконанні супутникових вимірювань однією з основних залишається проблема встановлення точності визначення місцеположення пунктів, якій присвячено досить багато досліджень. Вирішенням цієї проблеми займались вже у 80-х рр. і тривають до нашого часу, оскільки повної відповіді на це питання ще не отримано, а крім того, вдосконалення, які вводять в діючі системи та створення нових систем змінюють якість результатів супутникових систем, що потрібно враховувати.

Метою дослідження [71] було встановлення оптимальної тривалості спостережень для досягнення необхідної точності визначення місцеположення. За результатами дослідження авторами виведено емпіричну формулу залежності точності від довжини вектора. Також було зроблено припущення, що маючи "ідеальне" програмне забезпечення можна було б усунути ряд неточностей, які виникають в процесі опрацювання даних.

Виконуючи ГНСС-спостереження, необхідно також враховувати такий важливий фактор як відстані між приймачами. Відомо, що при збільшенні довжин векторів в мережі погіршується точність вимірів [7]. Хоча довжини векторів не є визначальним чинником впливу на точність результатів відносних спостережень. Також зі збільшенням відстані між одночасно працюючими

приймачами зростає час необхідний для вирішення багатозначності. А час, який необхідний для вирішення багатозначності та усунення з вимірів випадкових помилок, визначає тривалість спостережень [71].

Автори дослідження [81] поставили перед собою завдання дослідити залежність точності координат пунктів супутникових мереж від довжини векторів та тривалості спостережень. Для цього використані десятидобові спостереження двочастотними приймачами на вісімнадцятьох станціях. Мінімальна висота супутників над горизонтом встановлена  $15^\circ$ , а інтервал реєстрації супутникових сигналів становить 30 сек. Сформовано сеанси різної тривалості, а саме: 24 год – 110 сеансів, 12 год – 220 сеансів, 8 год – 330, 6 год – 440 та 4 год – 660 сеансів. Визначено одинадцять векторів довжиною від 26 до 300 км. При опрацюванні результатів спостережень програмним забезпеченням PAGES використані точні ефемериди. Результати опрацювання сеансів порівнювались з результатами десятидобових спостережень, які прийняті за істинні значення. Проведений аналіз результатів, отриманих з опрацювання проведених спостережень, виявив, що залежність точності координат від віддалей між пунктами в межах 26 - 300 км – досить мала. А залежність точності від тривалості сеансів (4 - 24 год), отримана шляхом апроксимування, виражається рівняннями:

$$\begin{aligned} m_x &= 9,5 \pm 2,1 / T^{0,5} \text{ мм}; \\ m_y &= 9,9 \pm 3,1 / T^{0,5} \text{ мм}; \\ m_z &= 36,5 \pm 9,1 / T^{0,5} \text{ мм}, \end{aligned} \quad (1.13)$$

де  $T$  – тривалість спостережень в годинах.

Автори визнають обмеженість і відносність показників точності, однак, виявилось, що отримані значення оцінки точності в 5-10 разів перевищують величини, отримані після врівноваження стандартними програмами, тобто такими, що використовуються пересічними користувачами.

То що ж має більший вплив на точність визначення координат пунктів: довжини векторів чи тривалість спостережень? Це питання розглянуте у роботі [141], яке є продовженням [81]. Для експерименту використані результати спостережень двочастотними приймачами протягом десяти днів на пунктах

національної мережі США (CORS). До уваги взято 11 векторів з довжинами від 26 до 300 км. Сформовано 10 сеансів тривалістю 24 години, 20 сеансів – 12 годин, 30 – 8 годин, 40 – 6-ти годинних сеансів та 60 сеансів тривалістю 4 години.

Були обчислені середні квадратичні помилки положення пунктів при різних довжинах векторів та тривалості спостережень, за якими побудовані графіки. Встановлено, що залежність точності визначення координат пунктів від довжин векторів при сеансах різної тривалості є досить малою. Виконаний статистичний аналіз, підтвердив, що погіршення точності визначення положення пунктів зі збільшенням довжин векторів є мінімальним. Однак, необхідно зауважити, що даний висновок сформований на основі результатів опрацювання лише 11 векторів для такого великого діапазону їх довжин (від 26 до 300 км). Автори статті пояснюють такий результат тим, що в дослідженні використовувалися точні ефемериди, що дозволило дещо підвищити точність визначення положення пунктів при довших довжинах векторів. Більш чіткою є залежність точності координат пунктів від тривалості вимірювань. Про це свідчить показаний на рис. 1.6 графік залежності точності визначення положення пунктів від тривалості сеансів спостережень, побудований за середніми значеннями СКП складових координат (планових (horizontal) та по висоті (vertical)) пунктів при всіх довжинах векторів.

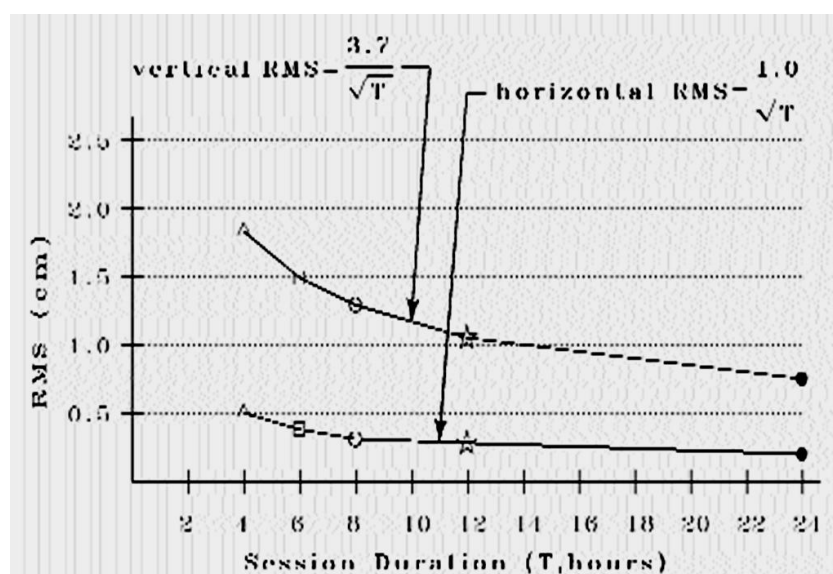


Рис. 1.6. Графік залежності точності визначення положення пунктів (RMS(cm)) від тривалості сеансів (session duration(T, hours)) [141]

Виведені рівняння, які найкраще описують залежність точності координат пунктів від часу:

$$СКП = k/\sqrt{T}, \quad (1.14)$$

де  $k$  – коефіцієнт, який для СКП горизонтальних компонент координат рівний 1, а для висотних – 3,7;  $T$  – тривалість сеансу в годинах. СКП визначається в сантиметрах.

Порівнявши даний графік з подібними графіками в [43, 81, 102, 142, 147] бачимо, що вони вказують на нелінійну залежність СКП визначення положення пунктів від тривалості спостережень. Для більш точного відображення такої залежності необхідно опрацювати дані більшої кількості різних діапазонів тривалості сеансів, особливо коротких, оскільки зменшення тривалості сеансів спостережень призводить до відчутного зростання помилок положення пунктів. При збільшенні тривалості спостережень (наприклад у [141] понад 8 годин) залежність точності визначення положення пунктів від тривалості сеансів стає близькою до лінійної.

У [142] взято до уваги більш короткі сеанси, а саме тривалістю від 1 до 4 год, та перевірено формулу (1.7), отриману в [81]. Для дослідження використані результати спостережень за тридцять днів з дискретністю запису супутникових сигналів 30 секунд та точні ефемериди. Виявили, що рівняння не можуть бути екстрапольовані для сеансів менших ніж 3 години. СКП кожної з просторових координат при тривалості спостережень 2 години становлять відповідно 0,8, 2,1 та 3,4 см, а для сеансів тривалістю 1 година ці значення ще зростають. Така точність для вирішення певних геодезичних задач є неприйнятною. Тому зроблений висновок, що оптимальною є тривалість сеансу 3 години.

В [147] використані результати спостережень на 13 перманентних станціях, які взяті з [137]. Крім того, взяті координати всіх станцій, які вважаються істинними. При опрацюванні даних фіксувалися такі параметри, як висота супутників над горизонтом –  $15^\circ$  та інтервал реєстрації супутникових сигналів – 30 секунд. З цих спостережень сформовано файли з результатами спостережень векторів різної довжини, які відповідно до довжини поділені на три групи:

- 1) короткі/середні (4,9; 19,9; 40,3 та 59,8 км);
- 2) довгі (201,3; 297,7; 402; 504,3 км);
- 3) наддовгі вектори (707,7; 796,4; 918,4 та 1004,1 км).

Кожен з цих векторів опрацьовано у сеансах тривалістю 1, 3, 6, 12 та 24 години при використанні точних та бортових ефемерид. Один з пунктів вибраний за вихідний і довжини векторів визначалися від даного пункту до інших дванадцяти. Визначені горизонтальні та вертикальні компоненти для кожної базової лінії та обчислені помилки за формулою:

$$3D\ Error = ((\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2)^{1/2}, \quad (1.15)$$

де  $\Delta X$  – різниця координат X двох пунктів,  $\Delta Y$  – різниця координат Y;  $\Delta Z$  – різниця Z.

За отриманими значеннями побудовані графіки залежності помилок довжин векторів від довжин векторів при використанні точних (precise ephemeris) та бортових (broadcast ephemeris) ефемерид. Для прикладу наведемо один з них, оскільки цього достатньо для відображення загального характеру вказаної залежності (рис. 1.7).

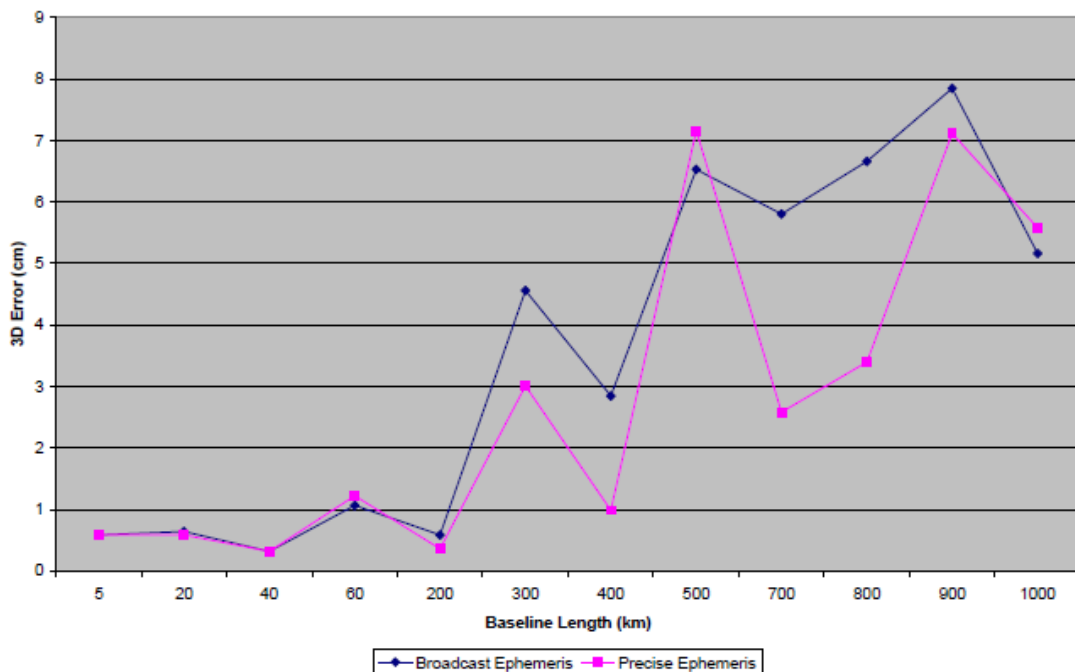


Рис. 1.7. Графік залежності величин помилок (3D Error (cm)) від довжини вектора (baseline length) при тривалості сеансу 12 годин [147]

Крім того, визначені СКП для кожної з вказаних вище груп векторів при різній тривалості спостережень відповідно використовуючи бортові та точні ефемериди. На рис. 1.8 для прикладу показаний графік залежності точності визначення векторів певного діапазону довжин від тривалості спостережень (time) та типу ефемерид.

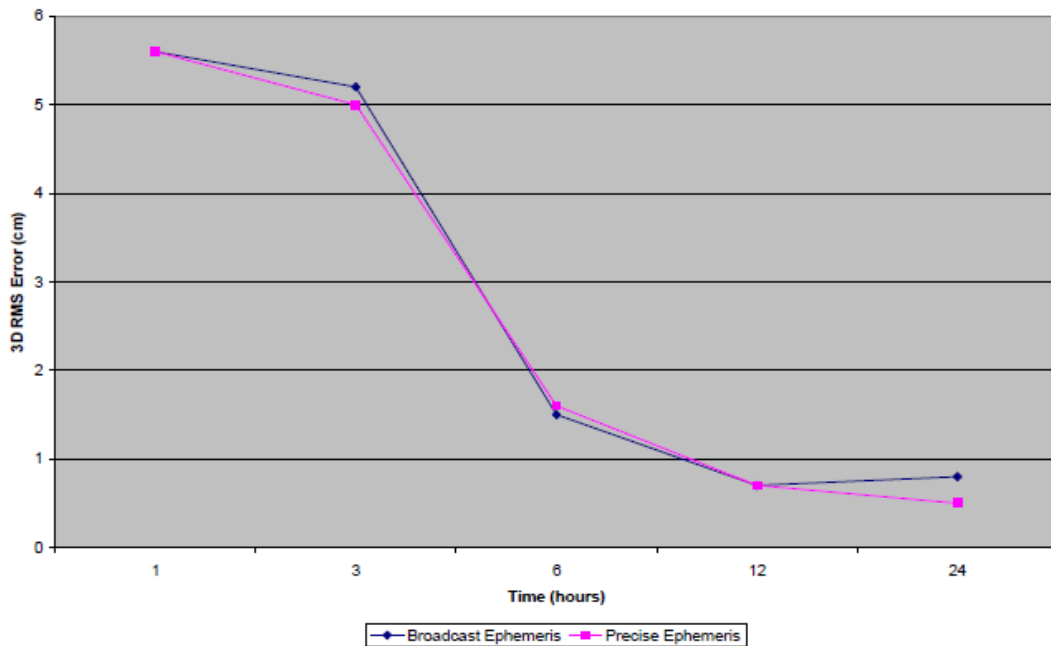


Рис. 1.8. Графік залежності точності (3D Error (cm)) від тривалості спостережень (time (hours)) для векторів з довжинами від 5 до 60 км [147]

Аналізуючи вплив тривалості на точність визначення довжин векторів, необхідно зауважити, що для всіх груп векторів найкращі результати отримані при сеансах спостережень від 6 до 24 годин. Хоча для наддовгих векторів точність їх визначення суттєво не покращується при тривалості сеансів більшій 6 год.

Питання залежності точності визначення координат пункту від тривалості GPS-спостережень та довжини вектора розкрито в [79]. Для цього використані результати спостережень протягом семи діб, отриманих з перманентних станцій Туреччини. Довжини векторів змінюються від 6 до 340 км, а тривалість спостережень – від 4 до 24 годин. Автори використовують для дослідження методику запропоновану в [81].

Результати дослідження залежності точності визначення положення пунктів від тривалості спостережень, довжин векторів, а також від типу

ефемерид (бортові і точні) наведені у роботі [102]. Спостереження виконувалися протягом кількох компаній 2003 – 2005 рр. на 31 перманентній станції Фінської мережі, з довжинами векторів від 0,6 до 1069 км. Тривалість спостережень становила від 10 хвилин до 24 годин. Для опрацювання результатів спостережень використали комерційне програмне забезпечення (Trimble Total Control), тому що, як зазначають автори, в багатьох дослідженнях використовують спеціальні наукові програми, а це не дозволяє отримати результати, такої ж якості, як і при застосуванні комерційних програм. І ці програмні забезпечення частіше використовуються на практиці.

На підставі отриманих результатів виведений математичний вираз залежності точності визначення місцеположення від довжини вектора та тривалості сеансу:

$$\log_{10}(z) = a + b \cdot \log_{10}(x) + c \cdot y, \quad (1.16)$$

де  $x$  – довжина вектора (км);  $y$  – тривалість сеансу (год);  $z$  – СКП положення пунктів (м);  $a, b, c$  – коефіцієнти.

Використовуючи рівняння (1.16), були побудовані графіки (рис. 1.9), які дозволили визначати при яких довжинах векторів, тривалості спостережень та типу ефемерид (precise or broadcast ephemeris) можна отримати значення СКП рівним 1, 2, 3, 4 та 5 см.

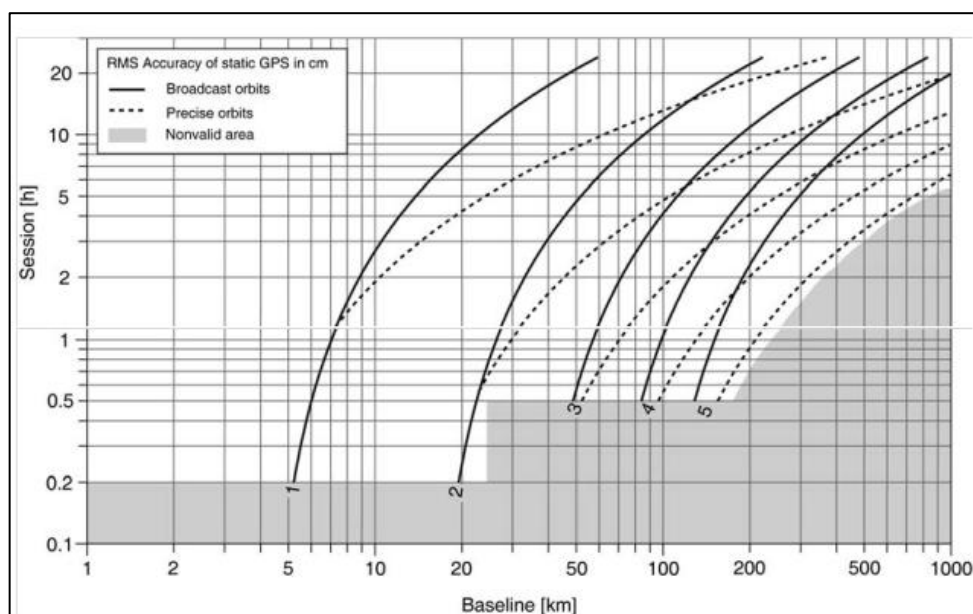


Рис. 1.9. Графік залежності точності положення пунктів від тривалості спостережень (session (h)), довжин векторів (baseline) (km) та типу ефемерид [102]

Отже, як бачимо (рис. 1.9), для векторів довжиною 6 км можна досягти точності визначення місцеположення 1 см при тривалості спостережень мінімум 30 хвилин. Щоб отримати СКП 2 см при довжинах векторів близько 20 км достатньо, виконати вимірювання тривалістю від 12 до 18 хвилин. Для векторів довжиною 50 - 200 км тривалість спостережень не повинна бути меншою 30 хвилин для досягнення точності визначення місцеположення 3, 4 і 5 см.

Дослідження [58] також виконане з метою встановлення необхідної тривалості GPS-спостережень в супутникових мережах для визначення положення пунктів та віддалей між ними із заданою точністю. В роботі використано результати спостережень двочастотними приймачами на чотирьох пунктах тривалістю дві доби. Мінімальна висота супутників над горизонтом була прийнята  $10^\circ$ , а інтервал реєстрації супутникових сигналів – 15 с. Зі спостережень сформували сеанси спостережень тривалістю від 1 до 24 год зі зростанням на одну годину, які були повністю опрацьовані. Один з пунктів прийнятий як референційний і відносно нього визначені координати трьох інших пунктів, а також довжини векторів (змінюються від 26 до 30 км) від даного до трьох пунктів. Отримані значення довжин векторів та координат трьох пунктів, які визначені зі сформованих сеансів спостережень, порівнювалися із значеннями, отриманими із дводобових спостережень. На основі одержаних результатів зроблені такі висновки:

1. Точність відстаней, обчислених за координатами пунктів, які визначені за сеансами однакової тривалості, є вищою ніж точність визначення координат.

2. При відстанях між пунктами 10 - 20 км, можна досягти точності визначення координат 1 мм, якщо вимірювання виконуватимуться не менше 17 годин, а для обчислення довжин векторів з такою точністю, необхідно, щоб GPS-спостереження тривали не менше 12 - 13 годин.

На наш погляд, для дослідження використано недостатньо даних для обґрунтування таких висновків.

Російська система диференціальної корекції і моніторингу (СДКМ) [43], основним завданням якої є оцінка якості функціонування космічних



навігаційних систем (КНС) ГЛОНАСС і GPS, виконує їх моніторинг та надає необхідну інформацію користувачам. Сервіс високоточного визначення місцеположення призначений для визначення абсолютних координат нерухомих об'єктів на основі опрацювання результатів вимірів ГЛОНАСС/GPS. Як відомо, точність оцінки координат користувачів залежить від тривалості спостережень. На сайті вказаної системи наведений графік такої залежності (рис. 1.10).

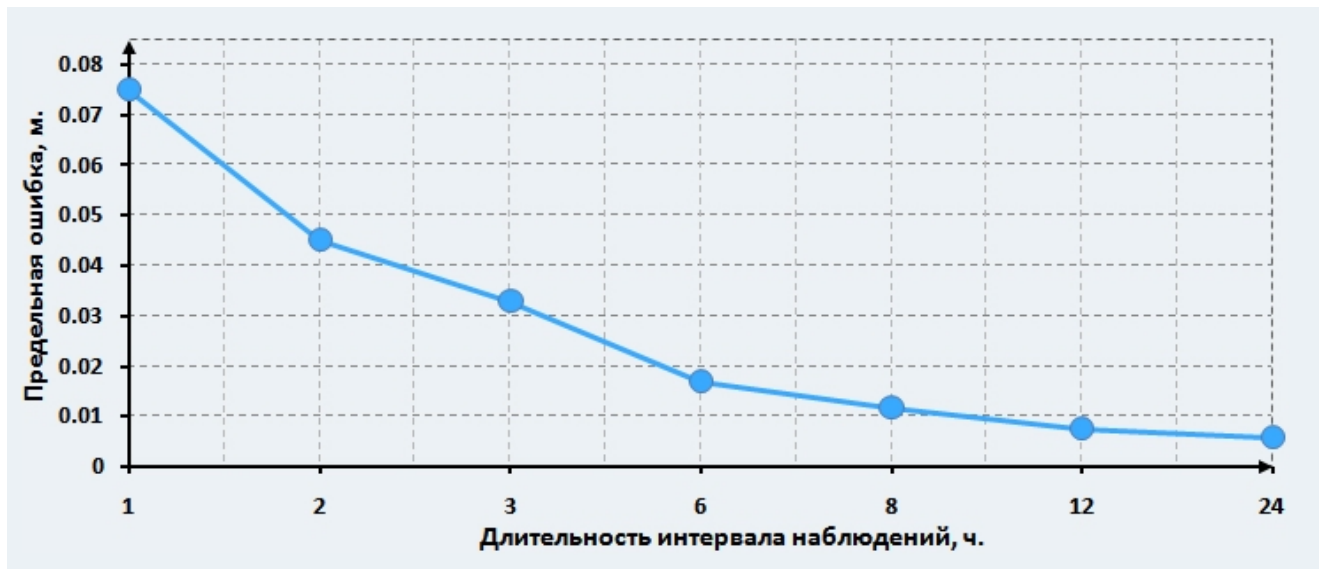


Рис. 1.10. Графік залежності точності визначення координат (предельная ошибка, (м)) від тривалості сеансу (длительность интервала наблюдений, ч)) [43]

Як бачимо з рис. 1.10, максимальне значення помилка (близько 0,08 м) матиме, якщо тривалість спостережень 1 година, а мінімальне (близько 0,01 м) при тривалості 24 години. Найнижча точність спостерігається на відрізку часу від 1 до 2 годин. Необхідно зауважити, що даний графік вимагає ще певних уточнень, тому представлена інформація, як вказують автори, може використовуватися тільки при плануванні сеансів.

Питання тривалості сеансів спостережень для досягнення необхідної точності вимірів розглянуто в [73]. Отже, виконуючи статичні вимірювання одночастотними приймачами мінімальна тривалість сеансу становитиме 10 - 30 хвилин, якщо довжини векторів не перевищують 1 км; 30 - 60 хвилин, якщо довжини векторів змінюються від 1 до 5 км; 60 - 90хвилин – від 5 до 10 км та 90

- 120 хвилин – 10 - 20 км. Одночастотними приймачами рекомендується виконувати вимірювання, якщо довжини векторів не перевищують 20км.

Тривалість спостережень визначається не тільки типом приймачів (дво- чи одночастотні) чи довжинами векторів, важливе значення мають і інші фактори, як от, наприклад кількість супутників, які спостерігаються. В табл. 1.8 наведена мінімальна тривалість спостережень для різного діапазону векторів, типу приймача та кількості супутників.

Таблиця 1.8

Тривалість спостережень дво- та одночастотними приймачами залежності від довжини вектора та кількості супутників, що спостерігаються [73]

Довжини векторів, км	Тривалість спостережень (хв)					
	4 супутники		5 супутників		6 або більше супутників	
	1*	2*	1*	2*	1*	2*
1-10	60	20	36	12	24	8
10-20	75	25	45	15	30	10
20-50	105	35	75	25	60	20
> 50	180	60	135	45	90	30

В таблиці 1.8: 1\* – одночастотні приймачі; 2\* – двочастотні приймачі.

В [73] також вказується, що отримати планові координати з точністю 10 мм, якщо вплив інших факторів є мінімальний, можливо:

- одночастотними приймачами, якщо тривалість спостережень становитиме  $10 \text{ хв} + 1 \text{ хв/км}$ ;

- двочастотними приймачами, якщо тривалість сеансу –  $5 \text{ хв} + 0,5 \text{ хв/км}$ ;

Виконуючи спостереження статичним методом і при цьому кількість супутників, які одночасно спостерігаються не менша чотирьох, параметр GDOP менший 6 одиниць, а довжини векторів змінюються від 20 до 100 км і більше, можна досягти точності супутникових визначень –  $5 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$ . Однак, дану точність можна підвищити до  $3 \text{ мм} + 0,5 \text{ ppm}$ , якщо використовувати антену типу "choke-ring" та збільшити тривалість сеансу.

Потрібно зауважити, що наведені параметри носять лише рекомендаційний характер. Крім того, ряд питань ще залишається без відповіді.

На пунктах Державної геодезичної мережі України проведено значний обсяг GPS-спостережень двочастотними приймачами з метою визначення їх місцеположення у новій референційній системі координат. Однак сьогодні широко впроваджені у виробництво одночастотні приймачі, які характеризуються широким спектром функціональних можливостей. Варто нагадати, що одночастотними приймачами рекомендується виконувати вимірювання для створення державних геодезичних мереж України, якщо довжини векторів не перевищують 10 км [23].

У роботі [46] розглянуто питання можливості використання одночастотних приймачів для визначення координат пунктів з необхідною точністю при тих чи інших довжинах векторів у мережах та різній тривалості сеансу спостережень. Для дослідження використано експериментальну мережу, яка розташована на території Закарпатської області. Спостереження на пунктах мережі, де були встановлені одночастотні приймачі (MBER, RUMO та OLYV) виконувалися 15, 45 та 120 хвилин. Відповідно до тривалості сеансу отримали наступні помилки визначення координат пунктів 1 - 5 см, 0 - 7 см та 2 - 5 см для приймачів типу ProMark-2. Хоча одержані результати і підтверджують очікувану точність визначення координат пунктів одночастотними приймачами, однак мають суто експериментальний характер, оскільки для формування кінцевих висновків необхідно продовжити дослідження, використавши більше даних за довший період. Результати досліджень також свідчать про те, що збільшення тривалості не є визначальним чинником підвищення точності визначення координат пунктів, оскільки існують фактори, які вносять похибки у результати вимірювань та накопичуються зі збільшенням тривалості.

У статті [85] дається аналіз результатів проведення спостережень з використанням одночастотних приймачів та зроблена оцінка точності згідно технічних рекомендацій, які є чинними в Польщі. Спостереження виконувались статичним методом на десяти пунктах, проведено чотири сеанси тривалістю 15 хв. Опрацьовано двадцять три вектори довжиною від 9,629 до 238,693 м. Загальна точність вимірювань векторів становить  $\pm 3$  мм, поправки у вектори

після врівноваження – 1 - 10 мм, тоді як поправки у координати змінюються від 5 до 9 мм. Крім того, врівноважені значення координат (X,Y) для кількох пунктів порівнювались з координатами, які визначені класичними наземними методами. Різниця між цими значеннями змінюється в межах від 0 до 21 мм.

Отже зроблено висновок, що GPS-спостереження одночастотними приймачами можуть забезпечувати точність, яка необхідна для створення польської національної мережі 3-го класу, при цьому тривалість спостережень не повинна бути меншою 15 хв.

В роботі [63], метою якої було розробити методику проведення GPS-спостережень на півдні Єгипту для вирішення задач геодезії. Розглянуті різні методи вимірювань та відповідно питання точності позиціювання в залежності від тривалості сеансів одночастотними приймачами, довжин векторів. Дослідження в даному напрямку складалося з двох етапів:

1. Сформовано вісім векторів довжиною від 2 до 19 км. Тривалість спостережень зростала зі збільшенням віддалі між приймачами, тобто короткі вектори до 4 км визначалися у сенсах тривалістю 10, 15, 20 хв, вектори довжиною 15,5 та 15,0 км – у сеансах 10, 15, 20, 30, 45, 60 хвилин, а вектори 16,2 та 18,8 км – 10, 15, 20, 30, 45, 60 та 75 хвилин. За отриманими результатами, були сформовані наступні висновки: рекомендована тривалість спостережень для векторів довжиною до 10 км становить  $10\text{хв} + 1\text{ хв/км}$ , а для векторів довжиною від 10 до 20 км становить  $15\text{хв} + 1,5\text{ хв/км}$ ; значення відносної помилки визначення довжини базової лінії вектора рівне  $5\text{ ppm}$  (5мм/км);

2. Розглядався лише один вектор довжиною 31 км, який опрацьовувався у сеансах тривалістю 15, 30, 60, 90, 120 хв. За отриманими результатами, встановили, що тривалість сеансу не повинна бути меншою 60 хвилин, якщо кількість видимих супутників 8, а PDOP не більше 2.

## **1.5. Вплив різних показників методики супутникових спостережень на точність довжин векторів та положення пунктів супутникових мереж**

### **1.5.1. Вплив типу ефемерид на точність супутникових визначень**

В даний час потреба у точних ефемеридах дещо зменшилася. Причиною цього є значні досягнення у розвитку системи GPS. Так, наприклад, ще близько восьми років тому похибка бортових ефемерид становила 20 м і для того, щоб мінімізувати їх вплив рекомендувалося істотно зменшувати відстані між приймачами, оскільки така неточність ефемерид викликала похибку при довжині базової лінії 20 км близько 2 см [2]. Згідно дослідження [18] значення похибок ефемерид супутників у 2000 р. перевищували аналогічні показники 2010 р. практично на порядок. З цього випливало б, що на векторах довжиною до 100 км використання бортових ефемерид є більш ніж достатнім. Однак, варто пам'ятати, що бортові ефемериди визначають тільки прогнозоване положення супутників на орбіті, а також можуть містити похибки, які у свою чергу впливатимуть на якість виконаних вимірювань.

За результатами дослідження [119], в якому розглядалася залежність точності визначення положення пунктів від віддалей між ними, встановлено, що точні ефемериди потрібно використовувати при довжинах векторів понад 40 км, оскільки при менших довжинах різниця у точності положення пунктів не перевищувала 1 см, тоді як при віддальях понад 90 км ця різниця становила 3 - 4 см.

Опрацьовуючи вектори, довжини яких перевищують 50 км, досить складно отримати фіксований тип рішення при використанні бортових ефемерид. Тоді, як при введенні точних ефемерид отримується фіксований результат [122].

У багатьох роботах питання точності визначення довжин векторів розглядається з точки зору зміни тривалості спостережень та різних довжин векторів. При цьому інші фактори або не беруться до уваги або фіксуються такі параметри, які встановлені інструктивними матеріалами і на зміну точності вони не впливатимуть. Як от, наприклад, кут відсічки встановлюється рівним

15°, інтервал реєстрації сигналів – 30 секунд, тип ефемерид – точні. Однією з таких робіт є [147], де розглядається питання залежності точності визначення параметрів векторів не тільки від тривалості сеансів, віддалі між одночасно працюючими приймачами, а також від ще одного чинника – типу ефемерид. В цьому дослідженні встановлено, що немає необхідності використовувати точні ефемериди при довжинах векторів до 60 км. За результатами спостережень тривалістю 24, 12, 6, 3, та 1 год різниця у точності положення пунктів, отриманих використовуючи бортові та точні ефемериди не перевищує кількох міліметрів. Тільки при векторах довших ніж 200 км та тривалості сеансів спостережень від 6 до 24 год точні ефемериди суттєво підвищують точність визначення положення пунктів.

В [47] за результатами порівняння бортових ефемерид з точними ефемеридами IGS зроблено висновок, що використання точних ефемерид є обов'язковим при виконанні високоточних ГНСС-спостережень.

Дослідження залежності точності визначення положення пунктів від аналогічних факторів, що і в [147] наведені у роботі [102] та [63]. В першій ([102]) результати показали, що точні ефемериди дозволяють зменшити тривалість спостережень. Так при довжинах векторів 20 км для досягнення точності 1 см, тривалість сеансу не повинна бути меншою від 4 год використовуючи точні ефемериди та 8 год – використовуючи бортові ефемериди.

В роботі [63], яка як і [102] більш детально розглянута у підрозділі 1.4, встановлено, що точність визначення положення пунктів, віддаль між якими не перевищує 5 км є однаковою при використанні остаточних та бортових ефемерид. При віддальх 10 - 20 км максимальні різниці між істинними значеннями координат та визначеними при різній тривалості сеансів спостережень, використовуючи бортові ефемериди, рівні:  $\delta_x = 11$  мм;  $\delta_y = 34$  мм та  $\delta_h = 38$  мм, що свідчить про гіршу якість отриманих результатів. Крім того, зроблені такі висновки: необхідно використовувати остаточні (final) ефемериди, якщо бортові містять помилку (СКП 3-D положення супутника більша ніж 6,0м); результати спостережень з використанням остаточних та бортових

ефемерид будуть однаковими, якщо кількість видимих супутників 7 - 8, значення DOP менше 2-ох одиниць, а СКП 3-D положення супутника менша ніж 3 м; збільшення тривалості спостережень дає змогу підвищити точність вимірів, якщо використовуються бортові ефемериди.

### **1.5.2. Вплив кута відсічки на точність визначення положення пунктів**

Найчастіше рекомендують використовувати сигнали супутників, які знаходяться на висоті  $0^\circ - 15^\circ$  над горизонтом [77],  $5 - 15^\circ$  [96] та  $10^\circ$  або  $15^\circ$  [75, 82]. В [104, 106] значення кута відсічки залежить від кількості супутників, які спостерігаються, так, якщо від 4 до 8 супутників встановлюють кут відсічки –  $15^\circ$ , до 10 супутників –  $10^\circ$ , не менше 12 супутників –  $5^\circ$ .

Сигнали супутників, які знаходяться близько до горизонту, не рекомендують використовувати, оскільки при зменшенні кута нахилу напрямку на супутник збільшується частина шляху його сигналу до приймача, яка проходить через тропосферу. Особливо погіршує ситуацію те, що шлях сигналу є близьким до поверхні Землі, тобто знаходиться в приземному шарі тропосфери, де мають місце найбільш інтенсивні зміни метеорологічних параметрів. В [94] вважають, що використання сигналів супутників, які знаходяться  $10^\circ - 15^\circ$  над горизонтом, дає змогу зменшити негативний вплив атмосфери на результати вимірювань. Ще однією причиною встановлення певного значення кута відсічки є необхідність зменшити вплив багатошляховості сигналів супутників, коли приймач приймає основний сигнал супутника, який пройшов шлях до приймача без заломлень, разом з відбитими від навколишніх об'єктів сигналами. Таке явище вносить помилку у виміряні віддалі до супутника.

Два підходи щодо визначення впливу кута відсічки на точність вимірювань розглянуто в [158]. У першому випадку спостереження виконувалися три дні двочастотними приймачами, а саме з 8 до 9 год, на двох станціях, розташованих

на віддалі 50 км одна від одної. При цьому кут відсічки змінювався від  $0^\circ$  до  $45^\circ$  з інтервалом  $5^\circ$ . За формулою:

$$3D\text{Error} = (\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta H^2)^{1/2}, \quad (1.17)$$

де  $\Delta X$  – різниця координат  $X$  двох пунктів,  $\Delta Y$  – різниця координат  $Y$ ;  $\Delta H$  – різниця висот. Необхідно зауважити, що формули (1.15) та (1.17) не є ідентичними, оскільки в останній використовується значення  $\Delta H$ . Побудований графік залежності точності позиціювання від кута відсічки (рис. 1.11), показав, що вона погіршується при куті відсічки більшому  $30^\circ$ .

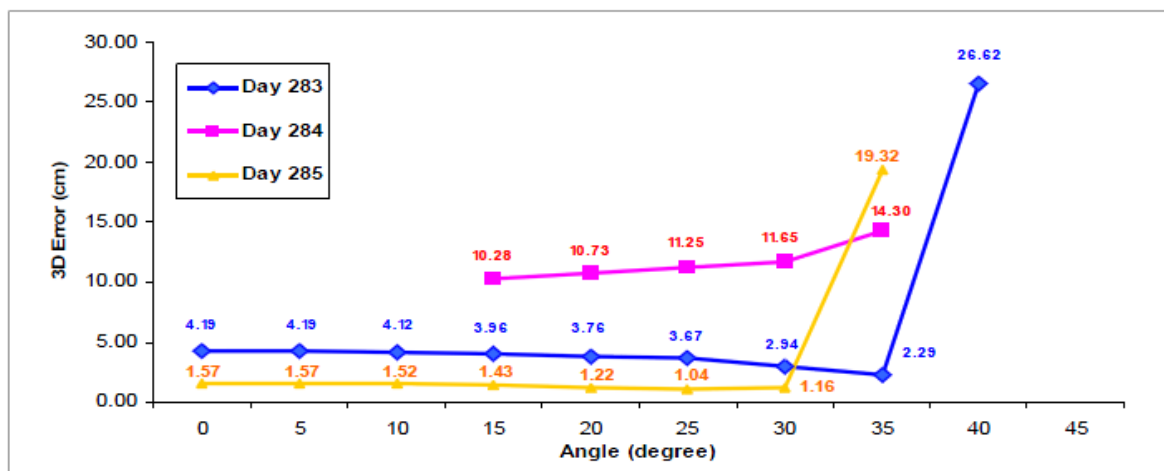


Рис. 1.11. Графік залежності точності визначення положення пунктів (3D error (cm)) від кута відсічки (angle (degree)) [158]

А у другому випадку, крім кута відсічки, який змінюється від  $0^\circ$  до  $45^\circ$  з інтервалом  $10^\circ$ , враховувався також період виконання спостережень протягом однієї доби (з 8 до 16 год), при цьому сформовано вісім одноденних сеансів. Однак, як і в першому, так і в другому випадку розглядався тільки один вектор довжиною 50 км. Найкращі результати в обох випадках отримані при кутах відсічки від  $20^\circ$  до  $30^\circ$ . Крім того, у другому випадку чітко простежується залежність якості вимірювань при різних значеннях кута відсічки від кількості супутників та їх геометричної конфігурації.

Певні аспекти використання GPS в умовах обмеженої видимості горизонту описані, зокрема, в праці [61], де одним з питань є дослідження точності GPS-спостережень різної тривалості (30 та 60 хвилин) двочастотними приймачами при



кутах відсічки  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  та  $15^\circ$ . Ці дослідження показали те, що найкращі результати отримують при використанні супутників при куті відсічки  $15^\circ$ , тобто вказаний в наших нормативних документах. Також було встановлено, що на техногенно-навантажених територіях допускається встановлювати кут відсічки рівним  $45^\circ$ .

В іншому дослідженні [135] кут відсічки змінювався від  $5^\circ$  до  $40^\circ$  з кроком  $5^\circ$ . Спостереження були виконані одночастотними мультисистемними приймачами. Результати досліджень показали, що використовуючи дві системи (GPS та ГЛОНАСС) геометрія розташування супутників (показник DOP) не є визначальним фактором впливу на фіксоване рішення часу. А це у свою чергу має прямий зв'язок з точністю визначення положення. Крім того, одним з завдань поставлених в [135] було визначення значення кута відсічки, яке дасть змогу зменшити негативний вплив багатопляховості сигналів, не погіршуючи при цьому геометрію супутників.

### **1.5.3. Вплив спільного використання сигналів супутників систем GPS і ГЛОНАСС на точність визначення довжини векторів та положення пунктів**

Можливість використання двох ГНСС, яка з'явилась в останні роки, збільшує кількість супутників, сигнали яких приймає приймач, тобто збільшує кількість величин, які вимірює приймач, для того щоб визначити своє положення. А також автоматично покращує показник GDOP, що повинно підвищити точність вимірювань. Перші результати досліджень показали, що використання сигналів супутників GPS + ГЛОНАСС не погіршує точності визначення координат пунктів [72].

Проведені дослідження для виявлення ефекту використання результатів спостережень супутників обох систем [17, 56, 72, 78, 80, 101, 113, 115, 117, 155] на точність визначення положення пунктів, а також з метою встановлення точності вимірювань, використовуючи систему ГЛОНАСС [101, 113, 115, 117, 155]. Результати досліджень [17, 78, 101, 115, 117] показали, що спільне використання систем підвищує точність визначення положення приймача. В

[155] зроблено висновок, що завдяки підвищенню якості геометрії розташування супутників можна покращити точність в 1,5 рази.

Проте результати інших досліджень, що виконані за даними спостережень на перманентних станціях, свідчать не на користь поєднання систем GPS та ГЛОНАСС. Для вирішення цього питання проведено дослідження [56] з використанням результатів спостережень тривалістю шість діб на 71 перманентній станції, що розташовані на території країн Європи, 30 з них – на території України. Аналіз повторюваності складових координат визначених з GPS/ГЛОНАСС-спостережень дозволив зробити висновок, що на середніх широтах Східної Європи використання у спостереженнях на перманентних станціях супутників ГЛОНАСС не покращує точності визначення координат. Такий висновок був зроблений також у роботі [72] для перманентних станцій розташованих у Західній Європі та у [65] (розглядалися дві мережі з довжинами векторів від  $\sim 599$  до  $\sim 1274$  км і  $\sim 136$  to  $\sim 473$  км).

До кінця невирішеними залишаються питання визначення параметрів переходу між системами координат WGS-84 та ПЗ-90, наявність в системі ГЛОНАСС так званої "секунди координації", несинхронність роботи годинників, а також певні відмінності у роботі апаратури двох систем. Все це створює суттєві перешкоди у спільному використанні двох систем та відповідно негативно впливає на точність вимірів [59, 161].

Однією з важливих проблем, яка виникає у разі спільного використання двох систем це інтерференція сигналів різних систем. Досить багато досліджень присвячено саме цьому питанню у зв'язку з обмеженими частотними ресурсами та чимраз більшою кількістю супутникових навігаційних сигналів [76, 152].

Однак, не зважаючи на наявні проблеми, є ряд переваг, а саме: можливість використання сигналів більшої кількості супутників у випадку обмеженої їх видимості [91], зменшення тривалості спостережень, підвищення якості визначення параметрів тропосфери та іоносфери, більш надійне виявлення та виключення з результатів вимірювань випадкових помилок. Необхідно відзначити також, що використання ГЛОНАСС має певні переваги при роботі у

"високих" широтах (США (Аляска), Канада, країни Скандинавії та ін.) [161]. В [38, 113] також рекомендується спільно використовувати ці дві системи у приполярних районах, міських та забудованих територіях.

Дослідження використання GPS та ГЛОНАСС в умовах обмеженої видимості розглянуте в [66]. Для дослідження використанні результати спостережень протягом двох місяців на семи перманентних станціях, що розташовані поблизу Сіднея (Австралія). Станції розташовані на відстані від 20 до 63 км одна від одної та мають можливість приймати сигнали двох систем GPS та ГЛОНАСС. Результати спостережень опрацьовані, використовуючи тільки сигнали супутників GPS, у першому випадку, тільки сигнали супутників ГЛОНАСС, у другому та двох систем одночасно – у третьому випадку. У кожному з випадків встановлювалися такі кути відсічки: 15°, 30°, 45°. В дослідженні також використані остаточні ефемериди, які надаються CODE (Center for Orbit Determination in Europe – Європейський центр визначення орбіт), оскільки точність їх визначення є вищою (2,5 см для GPS та 5 см для ГЛОНАСС), ніж порівнюючи з відповідними значеннями отриманими з IGS (5 см для GPS та 15 см для ГЛОНАСС). CODE – один з центрів, який надає ефемериди визначені для спільного використання сигналів двох систем GPS та ГЛОНАСС [3].

Автори [66] зробили висновок, що спільне використання двох систем не завжди підвищує точність вимірів в умовах "відкритого неба". Однак переваги використання обох систем стають очевидними при збільшенні кута відсічки, оскільки кількість видимих супутників двох систем є звичайно більшою ніж тільки однієї, а також геометрична конфігурація їх є кращою. Крім того, точність визначення положення пунктів є завжди вищою при використанні двох систем, ніж тільки ГЛОНАСС.

Як бачимо, однотайності в оцінці практичного ефекту використання двох супутникових систем практично нема. В [152] правильно вказані причини цього, які потрібно вирішити шляхом міждержавних погоджень. Це дасть можливість правильно враховувати особливості кожної з систем. Тому дослідження спільного використання обох систем ще є актуальними.

## 1.6. Обґрунтування поставлених у дисертаційній роботі завдань

Всі розглянуті нами в 1.3 дослідження залежності точності визначення довжини вектора від тривалості сеансів спостережень та відстані між одночасно працюючими приймачами виконані до 2005 року [5, 6, 54, 55, 129, 139], крім [25] – 2007 рік. На це важливо звернути увагу, оскільки, як відомо, основний етап модернізації супутників та наземного сегменту GPS відбувся до 2005р., але сам процес вдосконалення системи не завершився і до сьогодні [35]. Всі розглянуті функціональні залежності виведені у процесі розвитку системи GPS та ще на етапі формування системи ГЛОНАСС, питання впливу якої на точність визначення довжин векторів та виведення відповідних функціональних залежностей в жодній з розглянутих нами робіт інших вчених, не розглядалося. Сьогодні, зокрема, пріоритетними залишаються дослідження впливу тривалості спостережень та віддалі між одночасно працюючими приймачами, використання різних типів приймачів (двосистемні та односистемні, двочастотні та одночастотні). В багатьох джерелах тривалість сеансу визначається лише для одного випадку, а саме коли використовуються двочастотні приймачі.

Питання попереднього розрахунку точності визначення довжин векторів тісно пов'язане з проблемою залежності точності визначення положення пунктів від різних факторів, яка також не втрачає свої актуальності, зокрема через те, що супутникові системи та способи їх використання постійно вдосконалюються. Інформації про те, якої тривалості повинні бути сеанси спостережень при певних віддальях між одночасно працюючими приймачами, якщо застосовують двосистемні двочастотні приймачі, є досить мало.

Отже, як ми вже з'ясували, точність ГНСС-вимірювань залежить не тільки від тривалості сеансів чи віддалей між одночасно працюючими приймачами, але і від інших чинників. Назвемо деякі з них: геометрична конфігурація та кількість супутників; висота їх розташування над горизонтом, методика виконання спостережень та ін. [139, 140].

Однак врахувати їх загальний вплив на точність супутникових спостережень є досить складно. У багатьох дослідженнях поряд з основними чинниками, розглядають один чи два так би мовити другорядних. Тому спектр досліджень досить широкий, оскільки зумовлений вибором для аналізу тих чи інших факторів. Ці дослідження стали особливо актуальними тепер, коли:

- суттєво зросла точність бортових ефемерид, а також зросла можливість отримання ефемерид з різних джерел для постопрацювання супутникових спостережень, яке використовують при створенні геодезичних мереж;

- вдосконалюється обладнання користувачів, зокрема одночастотні приймачі, які використовуються для вирішення геодезичних задач;

- система ГЛОНАСС є повністю функціональною. Все частіше фірми-виробники пропонують багатосистемні приймачі, які можуть приймати сигнали не тільки двох функціонуючих систем GPS та ГЛОНАСС, але також введених в дію супутників системи Galileo.

Одним з параметрів методики супутникових спостережень є кут відсічки, значення якого встановлюють в нормативних документах залежно від точності вимірювань. Але параметри методики супутникових спостережень встановлені ще в минулому столітті, коли функціонувала тільки одна система NAVSTAR GPS та коли кількість функціонуючих супутників була меншою, ніж в наш час. Питання оптимального кута відсічки у зв'язку з наявністю двох функціонуючих ГНСС та розвитком інших є досить актуальним, оскільки збільшення кількості супутників, які "бачить" приймач, дозволяє збільшувати кут відсічки до допустимого значення показника GDOP, що повинно підвищити точність довжин векторів та координат пунктів супутникових мереж. Таким чином, кут відсічки тісно пов'язаний з двома іншими параметрами методики спостережень – кількістю супутників, сигнали яких приймає приймач, та показником GDOP. Збільшення кута відсічки зменшує кількість супутників, з якими має зв'язок приймач, та погіршує показник GDOP [114, 131, 133]. Тобто, практично, збільшення кута відсічки призводить до зменшення впливу багатошляховості та тропосфери, тобто підвищує точність вимірювань і в той же час понижує її,

тому що зменшується кількість супутників, до яких приймач вимірює віддалі та погіршується геометрія розташування супутників [110]. Отже метою досліджень є пошук оптимального значення кута відсічки.

Розглянувши низку досліджень [17, 56, 72, 78, 80, 101, 113, 115, 117, 155], з'ясували, що однастайності в оцінці практичного ефекту спільного використання двох супутникових систем GPS та ГЛОНАСС нема. У зв'язку із суперечливими висновками щодо цього питання, а також необхідності детального вивчення впливу використання супутників GPS та ГЛОНАСС у взаємодії з іншими параметрами методики супутникових спостережень на точність визначення положення пунктів супутникових мереж дослідження, в цьому напрямку ще є актуальними.

Нема однозначної відповіді і на те, коли потрібно використовувати точні ефемериди враховуючи зокрема вплив таких факторів, як: довжини векторів у мережі, тривалість сеансів спостережень, типи приймачів. Також необхідно зазначити, що сьогодні відповідні служби можуть запропонувати декілька типів ефемерид: бортові, остаточні, швидкі, ультра-швидкі.. Похибка визначення положення супутника за цими ефемеридами є в межах декількох сантиметрів (від 2,5 ... 5 см) [149]. Але досліджень ефекту використання цих ефемерид є небагато. Отже це питання ще остаточно не вирішено.

Технології, в яких передбачено використання сигналів супутників радіонавігаційних систем (СРНС), використовуються в геодезії починаючи з першої половини 90-х рр. минулого століття. Переваги використання супутникових технологій дають змогу стверджувати, що перспективи розвитку та розширення спектру застосування в такій галузі як геодезія є досить високими.

## ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ

1. Встановлені та проаналізовані основні джерела помилок, які впливають на результати ГНСС-спостережень, причини та можливості усунення чи зменшення їх впливу на результати спостережень з використанням супутникових технологій.

2. Визначені основні параметри методики створення супутникових мереж у різних країнах за результатами аналізу нормативних документів, який показав, що поставлені вимоги до проектування супутникових мереж, планування і організації проведення супутникових спостережень та опрацювання отриманих результатів, в основному враховують однакові показники: тривалість спостережень, значення кута відсічки, тип приймача, віддалі між ними тощо. Але встановлені вимоги до їх значень не є однаковими.

3. З'ясована необхідність подальших досліджень у питаннях встановлення залежності точності визначення довжин векторів від відстані між одночасно працюючими приймачами (дво- та одночастотними) та тривалості спостережень. Виявлені певні невирішені питання у встановленні залежності точності визначення положення пунктів супутникових мереж від тривалості спостережень та довжин векторів. Також проаналізований вплив на точність визначення довжин векторів та положення пунктів таких чинників, як: кут відсічки, тип ефемерид, можливість використання сигналів більшої кількості супутників у зв'язку з введенням в експлуатацію нових супутникових систем, зокрема ГЛОНАСС.

Враховуючи сучасний стан супутникових технологій та перспективи їх розвитку виникає необхідність проведення нових досліджень для з'ясування впливу вищеперелічених факторів на якість вимірювань.

## **РОЗДІЛ 2**

### **ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ДОВЖИН ВЕКТОРІВ ТА ПОЛОЖЕННЯ ПУНКТІВ В МЕРЕЖАХ, СТВОРЕНИХ З ДОПОМОГОЮ ГНСС**

У даному розділі описані дослідження залежності точності визначення довжин векторів від зміни тривалості спостережень та віддалей між приймачами, а також від типу приймачів, якими виконують вимірювання. За результатами цих досліджень встановлені для дво- та одночастотних приймачів функціональні залежності точності визначення довжин векторів від віддалей між одночасно працюючими ГНСС-приймачами та тривалості сеансів. Для об'єктивної оцінки отриманих результатів виконаний також порівняльний аналіз формул, виведених іншими дослідниками.

Також розглянуті питання, які стосуються встановлення точності визначення положення пунктів мереж. Виведені функціональні залежності точності визначення положення пунктів від тривалості сеансу спостережень двосистемними двочастотними приймачами, довжин та кількості векторів, що сходяться на кожному пункті мережі.

#### **2.1 Залежність точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень та відстані між одночасно працюючими приймачами**

Визначенням оптимальної тривалості відносних статичних ГНСС-спостережень займаються досить тривалий час. Це питання є важливим для геодезії, оскільки в наш час ГНСС-технології широко застосовують для вирішення різноманітних задач, в яких вимоги до точності отримання координат пунктів є різними, а також є різними віддалі між приймачами. Встановлено, що збільшення тривалості сеансу дає змогу підвищити точність параметрів векторів, що в свою чергу підвищує точність визначення взаємного положення пунктів, за умови, що вплив інших джерел помилок зведений до мінімуму. Збільшення тривалості сеансів дозволяє отримати більшу кількість



надлишкових вимірів, однак у випадку, коли більша частина цих вимірів спотворена похибками, значення яких перевищують загальний фон похибок, то це негативно відіб'ється на отриманих результатах вимірювань [46].

Точність виміру векторів встановлюється згідно інструктивних матеріалів за вказаного діапазону віддалей між одночасно працюючими приймачами та тривалості сеансів спостережень. У технічних характеристиках приймачів виробники ГНСС-обладнання вказують точність отримання параметрів векторів певного діапазону довжин при заданій тривалості спостережень, детальніші вказівки в них відсутні. В геодезичних роботах довжини векторів становлять від декількох десятків метрів до десятків кілометрів і вимоги до точності визначення їх параметрів є різними. Тому питання про те, якою конкретно повинна бути тривалість сеансів при тих чи інших віддальях між приймачами для досягнення необхідної точності визначення параметрів векторів, залишається до кінця невирішеним, про що свідчить велика кількість публікацій на цю тему [5, 29, 54, 55, 129].

Основним завданням виконаних нами досліджень було отримання залежності точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень та віддалей між приймачами, перш за все з метою вдосконалення методики оптимального проектування спостережень в ГНСС-мережах. Для того, щоб встановити такі функціональні залежності, необхідно було провести експериментальні дослідження на відповідних еталонних полігонах. На момент виконання досліджень у нас такої можливості не було. Крім того, щільність розташування перманентних станцій у нашій країні була низька, а нас цікавили в першу чергу мережі з короткими довжинами векторів. Тому, як відомо, в мережі INTERNET розміщені доступні результати супутникових спостережень та точні координати перманентних станцій. Постійно діючі базові станції GPS, ГЛОНАСС або GPS/ГЛОНАСС встановлюють у вигляді одиночних станцій або декількох станцій, що утворюють мережу. Станції розміщені у різних місцях, по всьому світу, і їх кількість постійно зростає. Мережа базових станцій

забезпечує єдину просторово-часову геодезичну основу точних і високоточних ГНСС-вимірювань, необхідних для вирішення багатьох прикладних задач [19, 20].

Нами були використані результати спостережень на перманентних станціях, які розташовані на території США (штат Каліфорнія). Вимірювання на яких виконувалися двочастотними GPS-приймачами з дискретністю запису сигналів 30 секунд.

Отже, розглядалося питання залежності точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень та віддалі між одночасно працюючими односистемними двочастотними приймачами, які змінювалися в межах від 5 до 20 км, тобто такі довжини векторів, які передбачені в державних мережах 2 класу.

У дослідженні використано результати спостережень за дві доби, 21 і 22 жовтня 2008 р., на 14 перманентних станціях, які були взяті з [137]. Із цих даних для дослідження вибрано тільки ті, за якими можна отримати параметри векторів довжиною від 5 до 20 км. Таких векторів виявилось 34. Таким чином ми отримали дві мережі, схеми цих мереж показані на рис. 2.1.

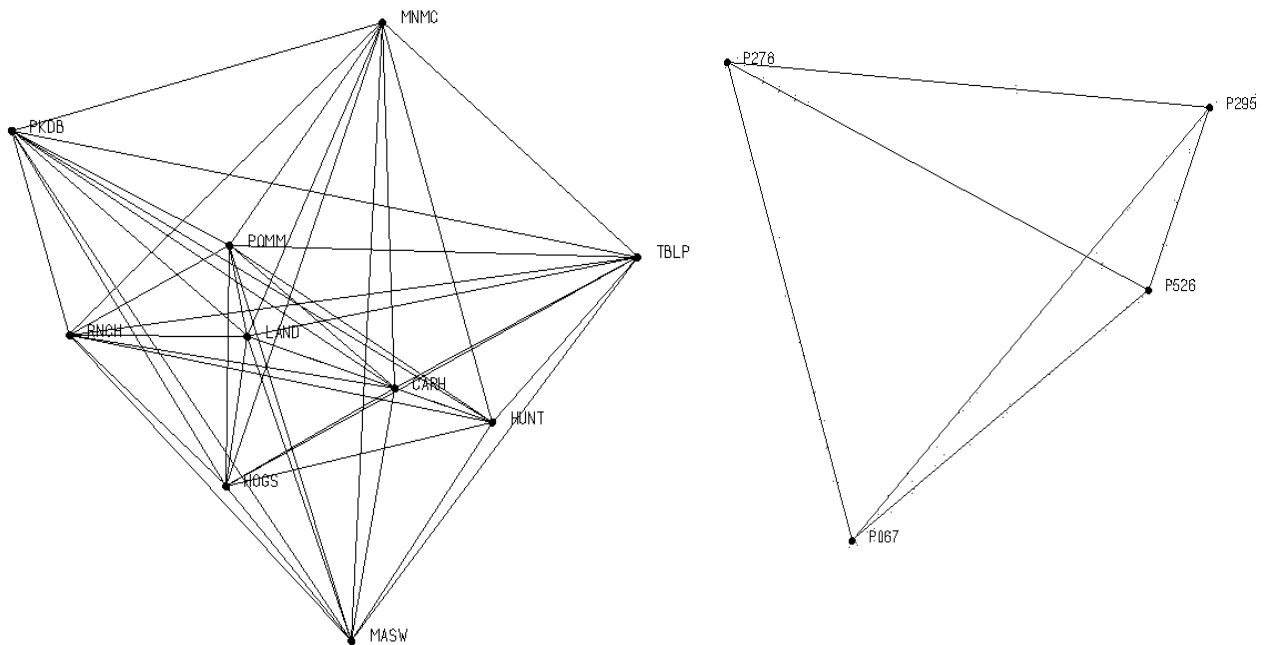


Рис. 2.1. Схеми мереж

Крім того, обчислені віддалі між перманентними станціями за геоцентричними координатами, взятими з [137] та, які визначені з довготривалих спостережень (значення координат та інші дані про перманентні

станції наведені у табл. 2.1). Ці довжини векторів в дослідженні використано, як точні їхні значення для порівняння з довжинами, обчисленими за результатами спостережень.

Таблиця 2.1

## Координати перманентних станцій

ID станції	Назва станції	Місце розташування	Тип антени	Координати, м		
				X, м	Y, м	Z, м
1	2	3	4	5	6	7
CARH	CARH_SCGN_CN2001	Parkfield / California	701945B_M w/SCIT Dome	- 2620445,4322	- 4460941,5578	3718446,6466
HOGS	HOGS_SCGN_CN2001	Parkfield / California	701945B_M w/SCIS Dome	- 2618467,5708	- 4462644,7786	3717747,7730
HUNT	HUNT_SCGN_CN2001	Parkfield / California	701945B_M w/SCIT Dome	- 2625065,1905	- 4460125,5776	3716663,8938
LAND	LAND_SCGN_CN2001	Parkfield / California	701945B_M w/SCIS Dome	- 2623331,5878	- 4463671,3690	3713566,3561
MASW	MASW_SCGN_CN2001	Parkfield / California	701945B_M w/SCIT Dome	- 2614188,1591	- 4462851,5262	3721323,9442
MNMC	MNMC_SCGN_CN2001	Parkfield / California	Choke Ring w/SCIT Dome	- 2623410,7214	- 4458420,3417	3719523,7963
P067	CleggRanchC_S2004	Cambria / California	Choke Ring w/SCIT Dome	-2618260,9875	-4456647,2905	3726074,3752
P278	ClarkeMtn_C_S2004	San Simeon / California	Choke Ring w/SCIT Dome	-2675936,1194	-4452984,6967	3687903,2060
P295	ChimneyRR_CS2004	Lake Nacimiento / California	Choke Ring w/SCIT Dome	-2675257,4761	-4441701,2637	3702496,5269
P526	RamageRnch_CS2004	Templeton/ California	Choke Ring w/SCIT Dome	-2662913,4036	-4454742,3910	3695682,5058
PKDB	Parkfield - BARD Station	Parkfield / California	700936 D/M Choke w/SCIS Dome	-2658829,0154	-4452735,2902	3701287,9384
POMM	POMM_SCGN_CN1993	Parkfield / California	701945B_M w/SCIS Dome	-2627226,7982	-4452757,6201	3723620,3970
RNCH	RNCH_SCGN_CN2001	Parkfield / California	701945B_M w/SCIT Dome	-2623159,1067	-4457075,8330	3721348,8963
TBLP	TBLP_SCGN_CN2001	Parkfield / California	701945B_M w/SCIT Dome	-2627524,8378	-4456235,7352	3719700,5762

Програмне забезпечення Trimble Geomatic Office дозволяє ділити результати добових спостережень на сеанси різної тривалості та кожен з них опрацьовувати окремо [150]. У такий спосіб для кожного з вибраних векторів сформовано чотири сеанси тривалістю 12 год, вісім сеансів тривалістю 6 год, 16 сеансів тривалістю 3 год, 24 сеанси – 2 год і 48 – 1 год. Всі сеанси спостережень опрацьовано та отримано параметри усіх векторів.

Після цього їхні значення порівнювалися з векторами, довжини яких обчислені за координатами, наведеними в табл. 2.1, їх точність є істотно вищою від точності векторів, отриманих за результатами супутникових спостережень. Різниці довжин, визначені за результатами спостережень та за координатами, вважались істинними помилками векторів, одержаних з супутникових спостережень, що дало змогу визначити середні квадратичні помилки всіх векторів, отриманих за результатами спостережень. Ці значення наведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Довжини векторів та їхні СКП (мм), за різної тривалості сесій спостережень

Довжини векторів, км	Тривалість спостережень, год				
	12	6	3	2	1
<i>I</i>	2	3	4	5	6
5,017	0,5	1,1	0,9	1,4	2,4
5,019	1,2	2,2	3,1	3,2	3,8
5,512	1,1	1,3	2,1	2,3	2,8
6,081	3,0	3,3	3,4	3,7	4,4
6,292	1,2	1,2	1,9	2,4	2,7
6,496	3,1	3,2	3,9	4,0	4,4
6,641	0,7	0,9	1,6	1,6	2,3
6,819	2,3	2,6	2,8	2,8	4,3
7,145	1,2	2,7	3,0	3,2	3,9
7,147	2,1	2,4	2,9	3,0	4,5
7,220	0,9	1,2	1,1	1,3	2,5
7,942	1,1	1,0	1,6	1,8	2,5
8,519	2,9	2,5	3,4	3,6	4,7
8,593	2,4	2,9	2,7	3,3	4,1
8,812	2,8	3,1	3,3	3,3	3,9
9,022	1,6	2,0	2,8	3,1	3,4
10,077	2,7	3,6	3,4	3,4	3,8
10,264	0,9	1,3	2,0	1,8	2,6
10,389	1,1	1,4	2,5	2,7	3,8
10,512	1,2	1,3	1,7	2,0	2,2
11,266	3,9	4,2	4,2	4,4	5,1
11,820	1,6	1,6	1,9	2,4	4,1
12,019	2,1	2,5	2,8	3,5	3,7
12,122	1,0	1,3	1,8	2,3	3,2
12,143	1,6	1,8	2,2	3,1	3,6
14,456	1,9	2,0	2,3	2,3	4,5
14,976	3,7	4,1	4,8	4,8	5,0
15,215	1,4	1,5	2,2	2,3	2,5
15,279	1,5	2,1	2,6	2,7	3,3

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6
15,342	0,5	0,9	1,5	1,7	4,0
16,648	1,5	2,0	2,6	2,6	3,7
18,459	2,5	3,2	3,4	3,5	4,6
19,206	5,4	5,4	5,7	5,4	5,9
19,827	1,9	2,3	2,7	2,7	3,4

Виконано кореляційний аналіз для встановлення залежності СКП довжини вектора ( $M$ ) від його довжини ( $S$ ) і тривалості спостережень ( $T$ ) за даними табл. 2.2. Результати виконаних обчислень наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

## Статистичні параметри СКП, довжин векторів та тривалості сесій

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

Результати обчислень коваріацій та коефіцієнтів кореляції між СКП довжин векторів та їхньою довжиною і СКП довжин векторів і тривалістю сеансів, наведені у табл. 2.4.

Таблиця 2.4

## Обчислення коефіцієнтів кореляції та їхні СКП за результатами спостережень двочастотними приймачами

Показник	$M$ і $S$	$M$ і $(T)$
$n$	170	170
$\sum_{i=1}^n S_i T_i$	5058,5851	1824,0
$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i T_i$	29,7564	10,7294
$\bar{S}$	2,6747	2,6747
$\bar{T}$	10,6764	4,8000
$c_{ST}$	1,2002	-2,1092
$r_{ST}$	0,2472	-0,4560
$\sigma_{ST}$	0,0720	0,0607
$ r_{ST}  /  m_{r_{ST}} $	3,43	7,51

За отриманими значеннями коефіцієнтів кореляції та стандартами складено рівняння регресії:

$$M_S = 0,069 \cdot S + 1,94; \quad M_T = -0,134 \cdot T + 2,03, \quad (2.1)$$

де  $S$  – довжина вектора в кілометрах;  $T$  – тривалість сеансу в годинах;  $M_S$  – СКП довжини вектора залежно від віддалі між приймачами, в міліметрах;  $M_T$  – СКП довжини вектора залежно від тривалості сеансу спостережень, в міліметрах.

Загальне рівняння регресії з прийнятими в [42] позначеннями має вигляд:

$$M - \bar{M} = A(S - \bar{S}) + B(T - \bar{T}), \quad (2.2)$$

де  $\bar{M}, \bar{S}, \bar{T}$  – середні значення СКП, довжин векторів та тривалості сеансів;  $A$  і  $B$  – коефіцієнти, які обчислюють за формулами:

$$A = \frac{r_{SM} - r_{TM} r_{ST}}{1 - r_{ST}^2} \cdot \frac{\sigma_M}{\sigma_S}, \quad B = \frac{r_{TM} - r_{SM} r_{ST}}{1 - r_{ST}^2} \cdot \frac{\sigma_M}{\sigma_T}. \quad (2.3)$$

Дані коефіцієнти обчислюють, підставляючи у формули (2.3) значення коефіцієнтів кореляції  $r_{SM}$  і  $r_{TM}$  взяті з табл. 2.4, а значення стандартів  $\sigma_M, \sigma_S, \sigma_T$  – з табл. 2.3. Точність отриманих значень коефіцієнтів визначена за [42]:

$$\sigma_A = \frac{\sigma_M}{\sigma_S} \sqrt{\frac{1 - r_{TM}^2}{n - 1}}, \quad \sigma_B = \frac{\sigma_M}{\sigma_T} \sqrt{\frac{1 - r_{TM}^2}{n - 1}}. \quad (2.4)$$

Отже,  $\sigma_A = 0,021$ ,  $\sigma_B = 0,020$ , тобто точність обох коефіцієнтів є практично однаковою.

Необхідно зауважити, що зв'язок між помилкою довжини вектора та тривалістю спостережень є тіснішим, ніж між помилкою довжини вектора та його довжиною, про що свідчать значення коефіцієнтів кореляції (див. табл. 2.4). Підставивши відповідні значення у формулу 2.2, запишемо загальне рівняння регресії:

$$M_{ST} = 0,069 \cdot S - 0,134 \cdot T + 2,6. \quad (2.5)$$

За результатами виконаного кореляційного аналізу отримана формула залежності СКП довжини вектора ( $M$ ) від його довжини ( $S$ ) та тривалості сеансу ( $T$ ).

Аналізуючи отримані результати встановлено, що реальна точність довжин векторів, визначених за результатами спостережень двочастотними

приймачами виробництва США, є істотно вищою від вказаних в технічних характеристиках приймачів.

Формула (2.5) дає змогу наближено встановити апріорну точність визначення векторів довжинами від 5 до 20 км при тривалості спостережень від 1 до 12 годин.

В даному дослідженні не враховано те, що в кореляційному аналізі використані середні квадратичні помилки довжин векторів, які обчислені на підставі різної кількості сеансів спостережень, тобто використані нерівноточні величини. Крім того, використано недостатньо даних, розглядаються 34 вектори з довжинами від 5 до 20 км, які визначені зі спостережень лише за дві доби. Зважаючи на це, а також на необхідність вирішення додаткових питань, що виникли при виведенні даної формули (2.5), вирішено дослідження в даному напрямку продовжити, вдосконаливши методику виконання, а також розширивши діапазон використовуваних даних.

## **2.2. Уточнення функціональної залежності точності визначення довжин векторів за результатами спостережень ГНСС-приймачами**

### **2.2.1. Характеристика мереж та методика опрацювання даних**

З метою уточнення формул визначення середніх квадратичних помилок довжин векторів за результатами спостережень, виконаних двочастотними приймачами та встановлення залежності точності визначення довжин векторів від їх довжин та тривалості сеансу спостережень одночастотними GPS-приймачами, використані результати спостережень, які взяті з [137] за 20 діб з 16 перманентних станцій, що розташовані на території штату Вашингтон (США).

Виконаний ретельний аналіз даних, які використані в дослідженні для того, щоб мінімізувати вплив чинників, що суттєво погіршують результати вимірів. Перевірка даних полягала в ідентифікації тих вимірів, які спотворені похибками, що перевищують загальний вплив похибок всіх виконаних вимірів і, здебільшого,

мають місце при незадовільних умовах видимості супутників на пунктах. В нашому випадку кількість супутників, які спостерігаються одночасно протягом цих 20 діб є не меншою п'яти. За допомогою програмного забезпечення Rinex Viewer виконаний аналіз RINEX-файлів [132].

Також проведений аналіз геометрії розташування супутників протягом цих діб за допомогою програми Planning з використанням навігаційного ефемеридного файлу формату YUMA, визначений параметр GDOP, який є суттєвим фактором впливу на точність результатів спостережень. В більшості випадків значення цього параметру протягом вибраних діб не перевищують три і лише декілька разів на короткі проміжки часу, здебільшого вночі, цей параметр зростав до шести одиниць. Отже, можна стверджувати, що геометрія розташування супутників на час вибраних спостережень є сприятливою, тобто відсутнє зниження точності параметрів векторів через незадовільну геометрію розташування супутників. Необхідно зауважити, що сьогодні є можливість також виконувати планування ГНСС-спостережень on-line [90] та [153], де вказавши необхідні параметри (місцеположення, кут відсічки, дату проведення спостережень, часовий пояс), можна переглянути необхідну інформацію для планування виконання вимірювань, а саме: кількість супутників, що спостерігатимуться, їх висота над горизонтом, траєкторія руху, значення параметрів DOP, параметри іоносфери. Таким чином результати аналізу геометрії розташування супутників, виконаного за допомогою програми Planning, підтвердилися.

З вибраних спостережень на 16 перманентних станціях сформовано мережу, яка складається з 120 векторів з довжинами від 1 до 25 км. Схема мережі представлена на рис. 2.2.



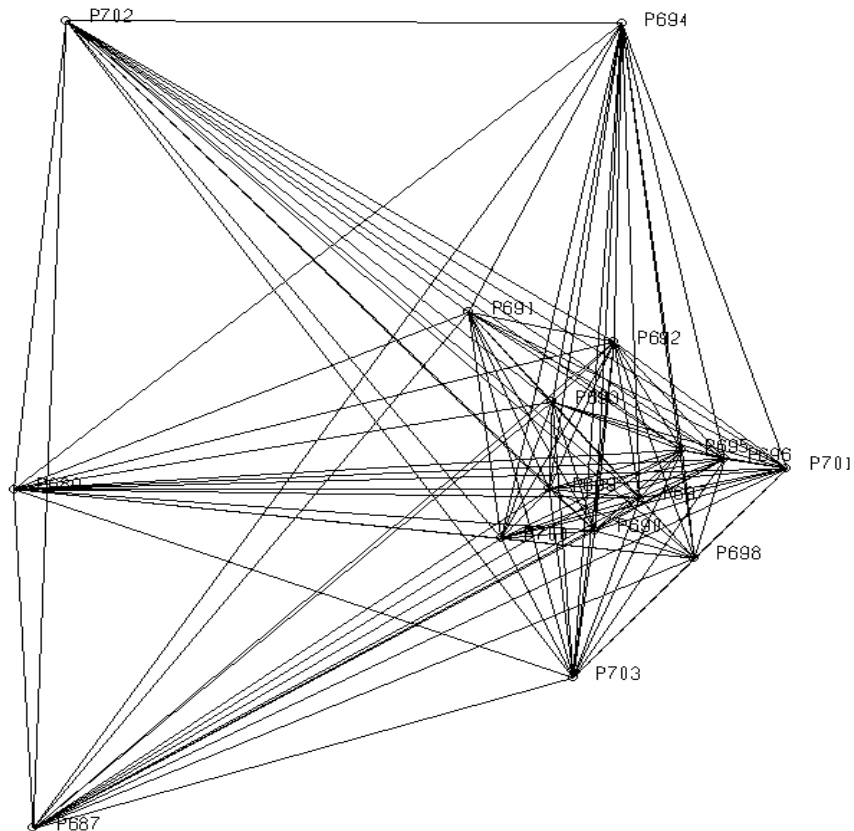


Рис. 2.2. Схема мережі – №1

Для двадцяти діб (на потрібну епоху) взяті геоцентричні координати перманентних станцій та визначені їх середні значення, за якими обчислені довжини векторів. Ці довжини прийняті за істинні і з ними порівнювались відповідні параметри векторів, отримані після опрацювання результатів спостережень.

Опрацювання спостережень виконано програмним забезпеченням Trimble Business Center, яке дозволяє з довготривалих спостережень не тільки формувати сеанси різної тривалості, але й не приймати до уваги результати спостережень на частоті L2, тобто опрацьовувати їх, як отримані одночастотними приймачами [44]. Перед опрацюванням даних вказувалися також такі параметри, як: мінімальна висота розташування супутників над горизонтом (кут відсічки) –  $10^\circ$  та тип ефемерид – бортові. Інтервал реєстрації супутникових сигналів становить 30 секунд.

Отже сформовано 20 сеансів тривалістю 24 год, 40 сеансів тривалістю 12 год та по 50 сеансів тривалістю 6, 3, 2, 1 і 0,5 год дво- та одночастотними GPS-приймачами. При тому для формування сеансів, тривалість яких менша 12 год, вибиралися спостереження проведені вдень (оскільки вдень здебільшого виконують спостереження). За різницями отриманими в результаті порівняння істинних (точних) значень довжин векторів та обчислених за результатами спостережень відповідно двочастотними та одночастотними приймачами, визначені середні квадратичні помилки всіх векторів за вказаної вище тривалості сеансів. Точність отриманих значень СКП:

$$m_m = \frac{m}{\sqrt{2n}}, \quad (2.6)$$

де  $n$  – кількість сеансів спостережень. Для СКП при всіх тривалостях сеансів, крім 12 та 24 год  $m_m = 0,1m$ , тобто середні квадратичні помилки отримані з точністю 10%. Одержані результати використані для аналізу вже існуючих формул (див підрозділ 2.2.2), а також для виведення функціональних залежностей точності визначення довжин векторів від довжин векторів та тривалості сеансів спостережень (див підрозділ 2.2.3).

Для апробації формул, зокрема, і виведених нами, використані результати спостережень на дев'ятнадцятьох перманентних станціях, які розташовані на території Франції та приймають сигнали таких двох глобальних супутникових систем як NAVSTAR GPS та ГЛОНАСС, тобто на них встановлені двосистемні приймачі. Дані взяті за 20 діб (вересень-жовтень 2011р) з [130] 3 вибраних спостережень сформовано мережу, яка складається з 171 вектора з довжинами від 3 до 89 км. Схема мережі представлена на рис. 2.3. З [130] взяті також значення геоцентричних координат цих перманентних станцій, за якими обчислені довжини векторів, які прийняті за істинні.

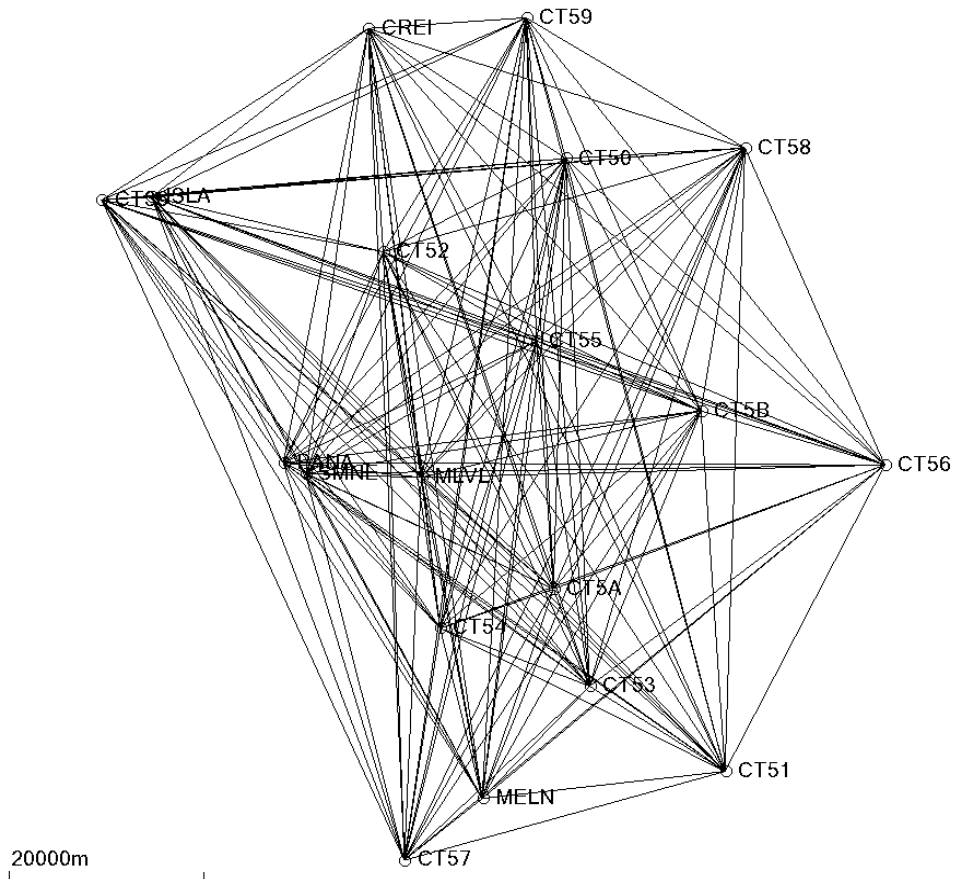


Рис. 2.3. Схема мережі – №2

Опрацювання спостережень виконано програмним забезпеченням Trimble Business Center. При цьому використовувалися точні та бортові ефемериди, а кут відсічки встановили рівним  $10^\circ$ .

Формування сеансів та їх опрацювання є аналогічним як для мережі №1. Отже сформовано по 50 сеансів тривалістю 6, 3, 2, 1 і 0,5 год двосистемними дво- та одночастотними приймачами. Сеансів тривалістю 12 год було сформовано 40 (20 денних та 20 нічних) і 20 сеансів тривалістю 24 год. Ці сеанси були опрацьовані та отримані параметри векторів при вказаних тривалостях спостережень відповідно двосистемними двочастотними та двосистемними одночастотними приймачами. Визначені за результатами спостережень довжини векторів порівнювалися з відповідними їхніми істинними значеннями, обчисленими за координатами перманентних станцій. В результаті отримані різниці, використовуючи які, обчислені СКП векторів за вказаної вище тривалості сеансів спостережень. Отримані значення СКП

довжин векторів мережі №2 використовуються суто для апробації формул, результати та відповідні висновки викладені у наступних підрозділах.

### **2.2.2. Порівняльний аналіз залежностей точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень та довжин векторів**

У підрозділі 2.1 обґрунтовані висновки, які доводять необхідність продовження досліджень у напрямку поглиблення вивчення проблеми залежності точності визначення довжин векторів від віддалей між одночасно працюючими приймачами та тривалості спостережень. Однак, передусім, необхідно з'ясувати актуальність та можливість використання функціональних залежностей, які раніше виведені іншими вченими. Як відомо, питання про те, якою буде точність визначення довжин векторів залежно від тривалості сеансів спостережень та різних віддаль між одночасно працюючими приймачами, досліджувалося вже неодноразово. У результаті були зроблені певні висновки та сформовані рекомендації, яких необхідно дотримуватися виконуючи спостереження, а також були виведені рівняння такої залежності. Для того щоб з'ясувати актуальність отриманих іншими авторами результатів вирішено виконати порівняльний аналіз, застосувавши формули інших вчених. Для перевірки використані результати спостережень, отримані для мереж, які представлені на рис. 2.2 (мережа №1) та рис. 2.3 (мережа №2). Отже, підставляючи необхідні дані у формули, а саме значення тривалості сеансів та довжин векторів, обчислені середні квадратичні помилки довжин векторів, які порівнювалися з СКП, отриманими за результатами спостережень для вказаних вище мереж. За визначеними різницями були обчислені середні квадратичні відхилення при різній тривалості спостережень, що дало можливість зробити певні висновки.

Детальний аналіз результатів досліджень, в яких були отримані функціональні залежності точності довжин векторів від тривалості

спостережень та довжин векторів [5, 6, 54, 55], які розглянуті нижче, виконаний у підрозділі 1.4.

За результатами дослідження [54] приладу Leica SR 9500 (для довжин векторів від 1 до 10 км та тривалості спостережень односистемними двочастотними приймачами від 10 хв до 2 год) виведене рівняння (1.10), яке за описаною вище методикою перевірене. До уваги взяті СКП довжин векторів мережі №1, які визначені за тривалості сеансу 2, 1, 0,5 год і віддалях між одночасно працюючими приймачами від 1 до 10 км та порівняні з відповідними значеннями СКП, обчисленими за формулою при встановлених в цьому дослідженні діапазоні довжин та тривалості сеансів спостережень. Результати для мережі №2, у якій віддалі між одночасно працюючими приймачами змінюються від 2,6 до 88,9 км, до уваги не бралися, оскільки, векторів довжиною до 10 км є лише 2, тому перевірку формули виконано тільки для мережі №1, де таких векторів є 69. Отримані значення середніх квадратичних різниць  $\delta$ , а також діапазон зміни значень різниць (max, min), отриманих між СКП, обчисленими за формулами та визначеними за результатами спостережень, наведені у табл. 2.5. Варто зауважити, що ми отримали лише додатні значення різниць.

Таблиця 2.5

## Результати перевірки формули (1.10)

Показники, мм	Тривалість спостережень, год		
	2	1	0,5
мережа №2			
max	13,5	18,4	20,2
min	2,7	2,6	2,7
$\delta$	7,397	9,530	10,204

Як бачимо, точність визначення СКП довжин векторів погіршується зі зменшенням тривалості спостережень зростають, отже дана формула правильно відображає тенденцію впливу тривалості сеансу на точність вимірювання векторів, яка полягає в тому, що зі збільшенням часу вимірювань зростатиме і точність визначення довжин векторів.

Різниці між обчисленими та отриманими зі спостережень значеннями СКП довжин векторів при тривалості сеансу 2 години змінюються від 2,7 до 13,5 мм, а сеансів 1 та 0,5 години відповідно 2,6 - 18,4 мм та 2,7 - 20,2 мм. Ці значення зростають зі збільшенням довжин векторів. Однією з причин таких суттєвих розходжень є те, що експериментальні виміри, на основі яких отримана така залежність, виконані вже досить давно (1999р.), а як відомо розвиток супутникових технологій є досить стрімким, особливо в напрямку підвищення точності вимірів.

Розглянемо ще одну формулу (1.11), яка виведена за результатами опрацювання 120 векторів довжиною від 10 до 50 км [55], які визначені з денних та нічних GPS-спостережень тривалістю 12, 6, 3, 2, 1 та 0,5 год. Для мережі №1, відповідно до вказаних вище значень довжин та тривалості спостережень, обчислені за формулою середні квадратичні помилки для векторів від 10 до 25 км (таких векторів є 51), які порівнювалися з відповідними значеннями, що були одержані за результатами спостережень. Для мережі №2 розглянуті СКП векторів довжиною від 10 до 50 км, таких векторів є 108. У таблиці 2.6 наведені значення середніх квадратичних відхилень  $\delta$ , а також діапазон зміни значень різниць.

Таблиця 2.6

## Результати перевірки формули (1.11)

Показники, мм	Тривалість спостережень, год					
	12	6	3	2	1	0,5
мережа №1						
max	14,9	15,2	17,2	19,5	28,9	63,9
min	4,6	4,2	4,4	4,4	5,9	10,6
$\delta$	7,940	7,779	8,459	9,202	12,921	26,261
мережа №2						
max	52,7	57,0	67,9	81,0	136,5	378,3
min	4,4	4,2	4,2	4,6	5,4	10,8
$\delta$	29,195	31,186	36,349	42,669	69,640	182,401

Аналізуючи отримані результати бачимо, що точність визначення довжин векторів суттєво погіршується при тривалості спостережень 0,5 год. Як зазначають автори публікації [55], максимально ефективною є тривалість сеансів

від 3 до 6 год і подальше збільшення тривалості суттєво точності не підвищує, що частково підтверджують отримані результати. Крім того, необхідно зауважити, що максимальні значення різниць для мережі №1 отримані для вектора довжиною 25,0 км, тоді як для мережі №2 – 49,2 км. Якщо порівнювати отримані значення різниць мереж №1 та №2 для діапазону векторів від 10 до 25 км, то вони є близькими. Найменші розходження між СКП, визначеними за результатами спостережень та обчисленими за формулою, отримані для найкоротших векторів та тривалості спостережень 12 і 6 год.

Також виконано порівняльний аналіз формули (1.12), результати наведені у табл. 2.7. Для перевірки формули для мережі №1 взяті параметри векторів довжиною від 1 до 25 км, для мережі №2 – від 3 до 89 км, які отримані з сеансів тривалістю 24, 12, 6, 3, 2, 1 та 0,5 год.

Таблиця 2.7

## Результати перевірки формули (1.12)

Показники, мм	Тривалість спостережень, год						
	24	12	6	3	2	1	0,5
мережа №1							
max	0,5	0,7	1,1	2,7	3,9	6,5	11,1
min	-0,3	-0,8	-1,0	-1,1	-0,9	-0,9	-0,2
$\delta$	0,190	0,432	0,611	1,065	1,452	2,584	4,477
мережа №2							
max	0,5	1,6	5,3	11,1	15,6	25,3	34,8
min	-1,7	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,6	0,4
$\delta$	0,563	0,807	2,645	5,659	7,998	13,459	19,758

Отже, як бачимо, у даному випадку отримані найменші розходження між СКП визначеними за результатами спостережень в мережах №1 та №2 та середніми квадратичними помилками довжин векторів, які обчислені за формулою (1.12).

Здебільшого залежність точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень та довжин векторів досліджується, використовуючи результати спостережень двочастотними приймачами, тобто для одночастотних приймачів таких формул виведено досить мало.

Запропонований в [5] метод визначення тривалості GPS-спостережень в залежності від заданої довжини вектора та необхідної точності його виміру

апробований авторами використовуючи одночастотні приймачі, тому формулу (1.12) ми перевірили за результатами спостережень одночастотними приймачами в мережах №1 та №2. Для мережі №2 розглядалися вектори довжиною до 30км, а мережі №1 – 25 км. Отримані результати наведені у табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Результати перевірки формули (1.12) для одночастотних приймачів

Показники, мм	Тривалість спостережень, год						
	24	12	6	3	2	1	0,5
мережа №1							
max	-0,2	-0,2	0,2	1,6	2,7	5,7	10,1
min	-1,4	-1,4	-1,7	-1,8	-1,9	-1,7	-1,1
$\delta$	0,678	0,913	0,980	0,925	1,214	2,125	3,823
мережа №2							
max	-0,5	-0,3	0,3	1,9	2,8	6,1	10,8
min	-1,4	-1,3	-1,3	-1,5	-1,5	-1,0	-0,6
$\delta$	0,959	0,821	0,397	1,087	1,818	4,292	7,925

Порівнюючи результати наведені в табл. 2.7 та 2.8, отримані для мережі №1, бачимо, що при тривалості сеансів 3 год і менше для одночастотних приймачів розходження між СКП, визначеними за формулою (1.12) та СКП, отриманими зі спостережень, є дещо меншими. Від'ємні різниці свідчать про те, що СКП, обчислені за формулою є меншими, тобто точність визначення довжин векторів за результатами спостережень є гіршою. Зі зменшенням тривалості спостережень від 6 год до 0,5 год різниці СКП зростають, особливо для мережі №2.

У праці [6] похибка вимірювання векторів у залежності від віддалі між одночасно працюючими приймачами (від 1 до 20 км) і тривалості сеансу для односистемних одночастотних приймачів, обчислюється за формулою (1.8).

Визначені середні квадратичні різниці, порівнюючи СКП, які обчислені за даною формулою та СКП довжин векторів, визначених за результатами спостережень односистемними одночастотними приймачами у мережі №1 та двосистемними одночастотними приймачами у мережі №2 при довжинах векторів до 20 км та тривалості спостережень 24, 12, 6, 3, 2, 1 та 0,5 год. У мережі №1 векторів вказаного вище діапазону довжин виявилось 115, тоді як у мережі №2 – 21. В табл. 2.9 наведені отримані результати.



Таблиця 2.9

## Результати перевірки формули (1.8)

Показники, мм	Тривалість спостережень, год						
	24	12	6	3	2	1	0,5
мережа №1							
max	64,7	65,3	65,0	64,9	64,7	64,0	62,9
min	9,4	5,2	3,3	1,5	0,9	0,0	-0,6
$\delta$	36,012	34,801	33,998	33,464	33,036	32,389	31,678
мережа №2							
max	65,1	65,9	65,6	64,9	64,5	63,8	63,0
min	13,6	10,3	8,1	6,7	6,0	5,4	4,4
$\delta$	52,483	52,046	51,574	50,796	50,295	49,729	48,893

Виконаний для одночастотних приймачів порівняльний аналіз показує, що зі збільшенням тривалості сеансу точність вимірювання векторів погіршується, а це не відповідає дійсності. Аналогічний висновок зроблений у [5]. Крім того, різниці між обчисленими та визначеними за результатами спостережень значеннями СКП є досить суттєвими.

Вище викладені результати порівняльного аналізу виведених формул для різного діапазону довжин векторів та тривалостей спостережень. Проаналізувавши обчислені СКП довжин векторів за виведеними функціональними залежностями в [54], [55], [5] та їх характер зміни зі зміною довжин векторів, дійшли висновку, що ці формули чітко відображають тенденцію впливу віддалей між одночасно працюючими приймачами на точність вимірювання довжин векторів. Відповідно до отриманих результатів точність погіршується зі збільшенням довжин векторів.

Для прикладу на рис. 2.4 наведемо графік залежності СКП довжин векторів від віддалі між одночасно працюючими двосистемними двочастотними приймачами при тривалості сеансів 24, 12, 6, 3, 2, 1 та 0,5 год для мережі №2.

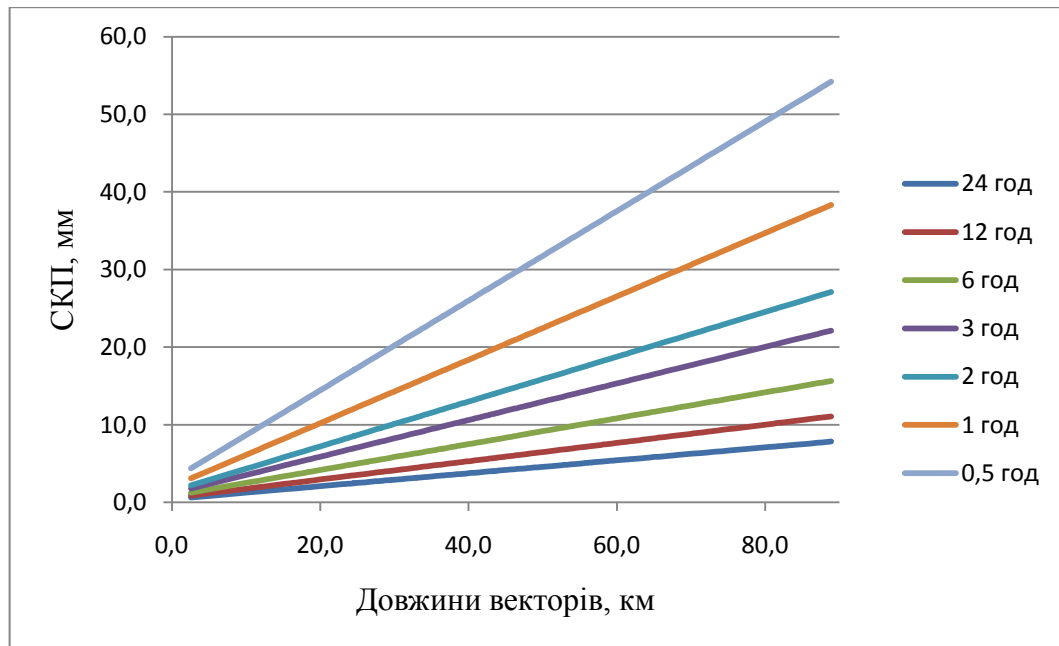


Рис. 2.4. Залежність точності довжин векторів від їх довжин при тривалості спостережень 24, 12, 6, 3, 2, 1 та 0,5 год

Значення середніх квадратичних помилок довжин векторів, за якими побудований графік (рис. 2.4), обчислені за формулою (1.12).

Крім того, чітко простежується залежність точності визначення довжин векторів двочастотними приймачами від тривалості спостережень – зі зменшенням тривалості сеансу точність погіршується. Однак для одночастотних приймачів така залежність не підтверджується.

Проаналізувавши різниці між СКП, які визначені за результатами спостережень двочастотними приймачами та обчисленими за формулами, нами встановлено, що найбільші розходження характерні для найдовших векторів при найкоротших сеансах спостережень, а найменші – для найкоротших векторів та найдовших сеансів, однак така тенденція не підтверджується для формули (1.12). Різниці СКП довжин векторів, отримані при різних тривалостях сеансів є майже однаковими за значенням для найкоротших віддалей між пунктами і зі збільшенням довжин векторів розходження між СКП, обчисленими за формулами і визначеними за результатами спостережень, зростають. Оскільки рівняння виведені за даними досліджень, які виконувалися не менше ніж 8 років тому від проведених нами, то це можна назвати однією з

основних причин суттєвих різниць між обчисленими та отриманими зі спостережень СКП довжин векторів. Необхідно також зауважити, що результати спостережень, які використані для виведення розглянутих функціональних залежностей, отримані тільки для однієї супутникової системи GPS, оскільки розвиток ГЛОНАСС в той час був на досить низькому рівні. Це також може вказувати і на більші розходження, отримані для мережі №2.

Отже, виконавши таку апробацію математичних залежностей точності визначення довжин векторів від їх довжин та тривалості спостережень, можна зробити висновок про те, що питання про тривалість сеансів в процесі побудови геодезичних мереж залишається і досі актуальним. Один з суттєвих недоліків всіх формул полягає в тому, що їх можна використовувати здебільшого для певного діапазону довжин векторів, тобто таких довжин для яких ці формули виведені. Отримані результати в більшості випадків підтверджують залежність точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень, тоді як питання, якою буде точність при тих чи інших довжинах векторів фактично залишається без відповіді. Крім того, залишається невирішеною проблема встановлення точності вимірювання довжин векторів одночастотними приймачами. Хоча, як відомо, супутникові спостереження на пунктах ДГМ виконуються здебільшого двочастотними приймачами за спеціальними методиками. Оскільки приймачі даного типу мають ряд переваг, зокрема:

1. Можливість корекції іоносферної помилки, що впливає на вимірювання первинних параметрів сигналів ГНСС-супутників, з використанням лінійної комбінації вимірювань на різних несучих частотах. Однак при дуже коротких віддальх використання двочастотних приймачів, насправді не є доцільним, оскільки при формуванні лінійних комбінацій вимірювань на двох частотах (так званих, "iono-free" комбінацій) призведе тільки до збільшення флуктуаційної (шумової) складової похибки вимірювань, що обов'язково відобразиться на точності визначення координат. Тому практично всі програмні забезпечення опрацювання сеансів спостережень GPS і GPS + ГЛОНАСС вимірювань за замовчуванням не застосовують "iono-free" комбінацій для базових векторів

коротших 5 км. У разі збільшення віддалі між приймачами кореляція іоносферних помилок для них знижується, що спричиняє збільшення впливу іоносфери. В такому випадку використання двочастотних приймачів є необхідним, оскільки дозволить отримати точніше і надійніше рішення для базового вектора, і як наслідок, визначати з більшою точністю координати пункту, при віддальях між приймачами до 100 км і більше.

2. Вимірювання первинних параметрів (псевдовіддалей і фаз несучих сигналів) на двох і більше частотах дозволяє оперативніше і надійніше виконувати рішення фазової неоднозначності. Для досягнення геодезичного рівня точності визначення координат, ГНСС-приймач повинен вирішити неоднозначність високоточних фазових вимірювань. В одночастотних приймачах цей процес є досить тривалим – 30...60 хв і залежить від багатьох чинників, насамперед від довжини базової лінії між двома приймачами. Двочастотні ГНСС-приймачі для вирішення неоднозначності використовують, так звані, різницеві або wide-lane і сумарні або narrow-lane комбінації вимірів (з довжинами хвилі відповідно 86,2 см і 10,7 см), які опрацьовуються з вибором оптимальних результатів. Така технологія дає змогу практично миттєво визначати вектори і відповідно координати приймача. Як наслідок, отримані результати будуть більш точними і надійними, ніж аналогічні отримані на одній частоті. Необхідно зауважити, що двочастотні ГНСС-приймачі при всіх своїх перевагах мають більшу вартість у порівнянні з одночастотними [39].

Сьогодні з появою нових геодезичних технологій, які задовольняють вимоги за точністю при вирішенні багатьох геодезичних задач та зважаючи на їх доступність, виникла потреба в розробці нових способів оптимального проектування геодезичних мереж та вдосконалення методів виконання спостережень, а також їх планування.

### 2.2.3. Виведення формул залежності точності визначення довжин векторів від тривалості сеансів спостережень та довжин векторів

Для встановлення залежності точності визначення довжин векторів від їхніх довжин та тривалості сеансу спостережень одночастотними GPS-приймачами, а також з метою уточнення формул визначення СКП довжин векторів за результатами спостережень, виконаних двочастотними приймачами використані результати, отримані для мережі №1, яка детально розглянута в підрозділі 2.2.1.

Проведений кореляційний аналіз для встановлення зв'язку між СКП довжин векторів ( $M$ ) і довжинами векторів ( $S$ ) та тривалістю сеансів ( $T$ ) не давав оптимального розв'язку. Для визначення характеру залежності СКП довжин векторів від віддалі між приймачами побудовані графіки, які вказували на їх лінійну залежність, тоді як графіки залежності СКП довжин векторів від тривалості спостережень свідчили про наявність нелінійної залежності, тобто більш складної (див. рис. А.1, А.2, додаток А). Також, були розглянуті графіки залежності точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень, побудовані іншими дослідниками. Так в [129] вказується на те, що якнайкраще відображає зв'язок між СКП довжин векторів і тривалістю сеансу експоненціальна крива. В нашому випадку експоненціальна крива недостатньо точно відображає такий зв'язок, тому виконавши детальний аналіз отриманих результатів вирішено, що двофакторний кореляційний аналіз потрібно виконати між СКП довжин векторів та віддалю між приймачами і коренем квадратним тривалості спостережень. Однак виведена формула мала декілька недоліків, зокрема при тривалості спостережень 0,5 год розходження між значеннями СКП, визначеними зі спостережень та СКП, обчисленими за формулою, були досить значними. Тому вирішено виконати також двофакторний кореляційний аналіз між СКП та віддалю між приймачами і натуральним логарифмом тривалості сеансів. За значеннями СКП довжин векторів, які визначені за результатами спостережень різної тривалості

побудовані графіки, у яких значення на осі тривалості сеансів відображені у логарифмічному масштабі. Таким чином залежність точності довжин векторів від тривалості спостережень набула лінійного характеру, що підтверджує зв'язок між СКП і натуральним логарифмом тривалості сеансів. Оскільки така тенденція має місце при всіх довжинах векторів, тому для прикладу на рис. 2.5 наведений графік для вектора довжиною 15,026 км, який визначений за результатами спостережень двочастотними та одночастотними GPS-приймачами.

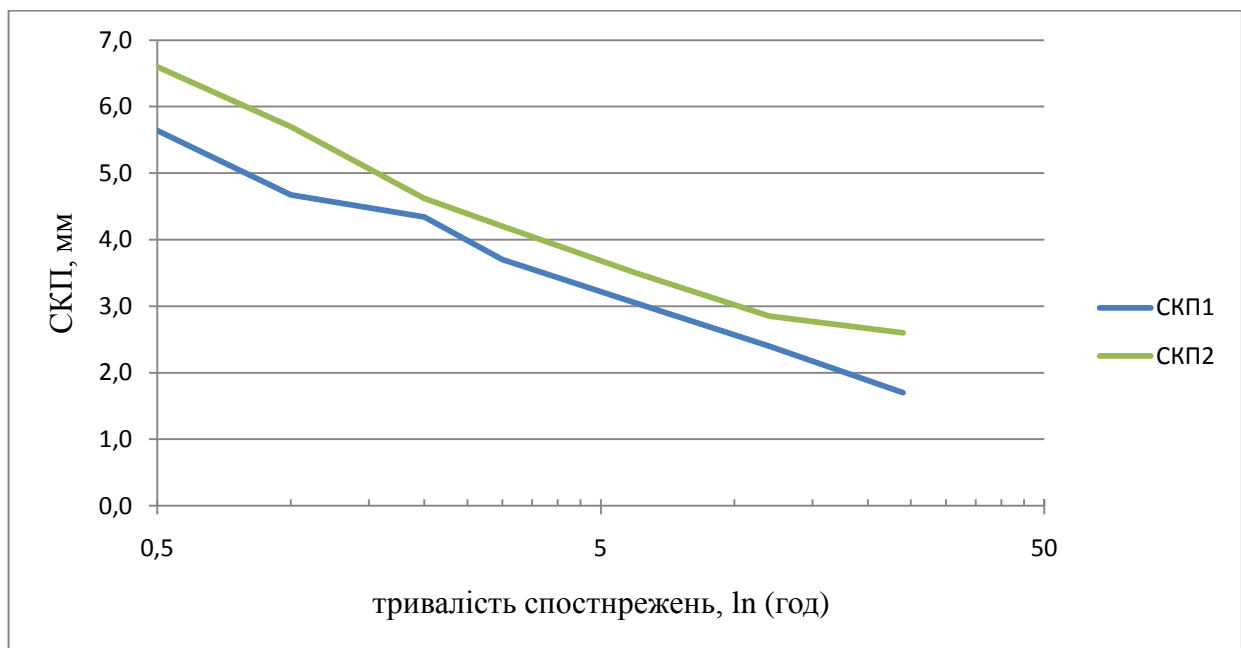


Рис. 2.5. Графік залежності СКП довжин векторів від натурального логарифму тривалості спостережень

На графіку (рис. 2.5) СКП1 – середні квадратичні помилки довжин векторів визначені за результатами спостережень двочастотними приймачами, тоді як СКП 2 – одночастотними.

Таким чином для отримання залежності між СКП довжини вектора ( $M$ ) та його довжиною ( $S$ ) і тривалістю спостережень ( $T$ ) виконано кореляційний аналіз, основні етапи виконання якого розглянуто нижче. Результати обчислень наведено в табл. 2.10.

Таблиця 2.10

## 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
Сума квадратів всіх значень параметра	8664,1943	14473,2890	21,6530
Середнє значення квадрата параметра	10,3145	120,6107	3,0933
Стандарт	1,2802	6,0032	1,2650
одночастотні приймачі			
Кількість, $n$	840	120	7
Сума всіх значень параметра	3087,0469	1103,5565	8,5533
Середнє	3,6751	9,1963	1,2219
Сума квадратів всіх значень параметра	13004,1131	14473,2890	21,6530
Середнє значення квадрата параметра	15,4811	120,6107	3,0933
Стандарт	1,4054	6,0032	1,2650

У табл. 2.11 наведені результати обчислень коваріацій та коефіцієнтів кореляцій між середніми квадратичними помилками довжин векторів та віддалями між приймачами і СКП довжин векторів та тривалістю сеансу для векторів від 1 до 25 км.

Таблиця 2.11

## Результати обчислення коефіцієнтів кореляції та їхніх СКП

Показник	Двочастотні		Одночастотні	
	$M i S$	$M i \ln(T)$	$M i S$	$M i \ln(T)$
$n$	840	840	840	840
$\sum_{i=1}^n S_i \ln(T_i)$	25234,5076	1803,5850	31358,7569	2454,2602
$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \ln(T_i)$	30,0411	2,1471	37,3319	2,9336
$\bar{S}$	9,1963	1,2219	9,1963	1,2219
$\overline{\ln(T)}$	2,9454	2,9454	3,6751	3,6751
$c_{S, \ln(T)}$	2,9541	-1,4519	3,5349	-1,5569
$r_{S, \ln(T)}$	0,3844	-0,8965	0,4190	-0,8758
$\sigma r_{S, \ln(T)}$	0,0294	0,0068	0,0284	0,0080

Виконаний кореляційний аналіз підтвердив наявність зв'язку між СКП довжин векторів і віддалю між приймачами та логарифмом тривалості

сеансів спостережень. Значення коефіцієнта кореляції між СКП і логарифмом тривалості сеансів близьке до  $-0,9$ , тоді як коефіцієнт кореляції між СКП і віддалю між приймачами близький до  $+0,4$ , що свідчить про слабший зв'язок.

За отриманими значеннями коефіцієнтів кореляції та стандартами складено рівняння регресії відповідно для двочастотних та одночастотних приймачів:

$$\begin{aligned} M_S &= 0,0820 \cdot S + 2,19; & M_T &= -0,9073 \cdot T + 4,05; \\ M_S &= 0,0981 \cdot S + 2,77; & M_T &= -0,9729 \cdot T + 4,86, \end{aligned} \quad (2.7)$$

Крім того, були отримані рівняння множинної регресії між СКП довжини вектора та його довжиною і тривалістю сесії:

- для спостережень двочастотними приймачами:

$$M = 0,0820 \cdot S - 0,9073 \cdot \ln(T) + 3,3, \quad (2.8)$$

- для спостережень одночастотними приймачами:

$$M = 0,0981 \cdot S - 0,9729 \cdot \ln(T) + 4,0, \quad (2.9)$$

де  $S$  – довжина вектора в км,  $T$  – тривалість сеансу в год,  $M$  – СКП довжин векторів в мм.

Точність отриманих значень коефіцієнтів визначена за формулою (2.4). Отже,  $\sigma_A=0,007$ ,  $\sigma_B=0,015$ , тобто точність першого коефіцієнту є практично в два рази більшою. Для одночастотних приймачів відповідно отримаємо:  $\sigma_A=0,007$ ,  $\sigma_B=0,018$ .

Щоб підтвердити зв'язок між СКП довжин векторів та натуральним логарифмом тривалості сеансів спостережень виконаємо порівняльний аналіз функціональних залежностей, отриманих в ході досліджень. Як приклад, розглянемо вектор довжиною 15,026 км. Для дво- та одночастотних приймачів нижче наведені для порівняння графіки СКП довжин векторів (рис. 2.6), які отримані за результатами спостережень та СКП, обчислених за формулами виведеними за результатами кореляційного аналізу:

1. Якщо зв'язок між СКП довжин векторів та тривалістю сеансів є лінійним:



$$M = 0,0820 \cdot S - 0,1295 \cdot T + 3,1 \text{ – для двочастотних приймачів,} \quad (2.10)$$

$$M = 0,0981 \cdot S - 0,1366 \cdot T + 3,7 \text{ – для одночастотних приймачів.}$$

2. Між СКП та віддалю між приймачами і коренем квадратним тривалості спостережень:

$$M = 0,0820 \cdot S - 0,7965 \cdot \sqrt{T} + 4,0 \text{ – для двочастотних приймачів,} \quad (2.11)$$

$$M = 0,0981 \cdot S - 0,8461 \cdot \sqrt{T} + 4,7 \text{ – для одночастотних приймачів.}$$

2. Між СКП та віддалю між приймачами і натуральним логарифмом тривалості сеансів (формули (2.8) та (2.9)).

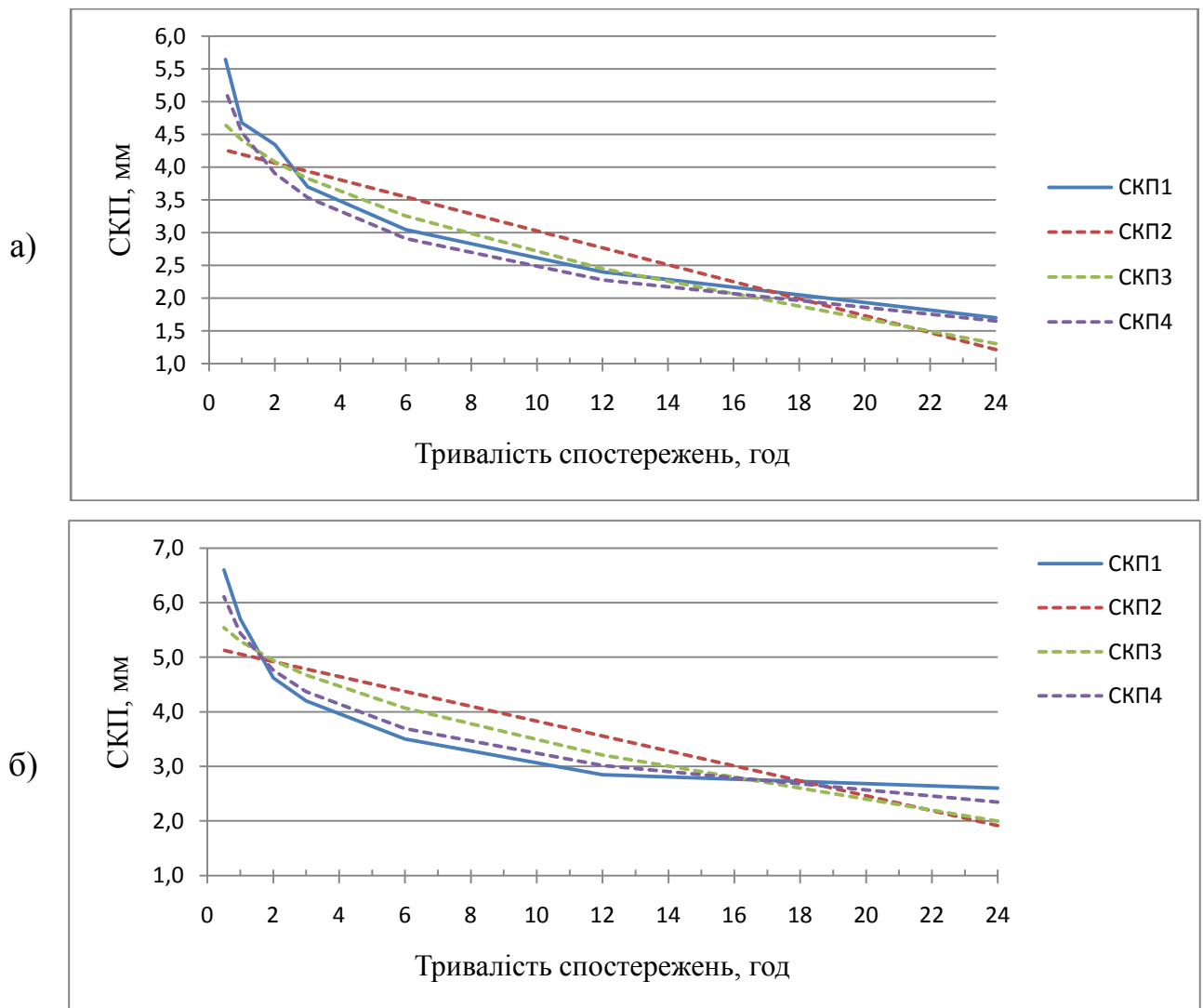


Рис. 2.6. Графік залежності СКП довжин векторів від тривалості спостережень для вектора довжиною 15,026 км

а) спостереження двочастотними приймачами.

б) спостереження одночастотними приймачами.

На графіку (рис. 2.6) показані СКП1 – СКП визначені за результатами спостережень, СКП2 – СКП обчислені за формулою (2.10), СКП3 – СКП обчислені за формулою (2.11), СКП4 – СКП обчислені за формулами (2.8) та (2.9) залежно від типу приймача (дво- чи одночастотний).

Для більш об'єктивної оцінки отриманих нами залежностей, значення СКП довжин векторів при всіх тривалостях сеансів спостережень, які були обчислені за рівняннями (2.8) та (2.9), порівнювались з СКП, отриманими за результатами спостережень. Обчислені середні квадратичні значення різниць ( $\delta$ ) вказують на точність формул (2.8) і (2.9). Ці значення для всіх тривалостей сеансів спостережень наведені в табл. 2.12, а також діапазон зміни значень різниць, отриманих між СКП, обчисленими за формулами (2.8) та (2.9) та визначеними за результатами спостережень.

Таблиця 2.12

Результати порівняння СКП, отриманих за результатами спостережень та обчислених за формулами (2.8) та (2.9), мм

Показники, мм	Тривалість спостережень, год						
	24	12	6	3	2	1	0,5
Двочастотні приймачі							
max	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,9	0,7
min	-0,3	-0,5	-0,5	-0,3	-0,5	-1,0	-1,1
$\delta$	0,18	0,24	0,22	0,27	0,27	0,34	0,40
Одночастотні приймачі							
max	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,7
min	-0,6	-0,5	-0,6	-0,4	-0,4	-0,7	-0,8
$\delta$	0,26	0,28	0,31	0,34	0,34	0,40	0,40

Середні квадратичні різниці для сеансів від 6 до 0,5 год не перевищують 10% значення СКП, отриманих за результатами спостережень. І тільки при тривалостях сеансів 12 і 24 год їх значення є більшими.

За отриманими значеннями СКП довжин векторів для кожної тривалості сеансів та значеннями СКП, обчисленими за формулами (2.8) та (2.9), побудовані графіки відповідно для двочастотних та одночастотних GPS-приймачів. Ці графіки показані на рис. А.1(див. додаток А).

Як бачимо з графіків, визначенні за формулами значення СКП загалом відповідають усередненим значенням СКП, отриманим за результатами

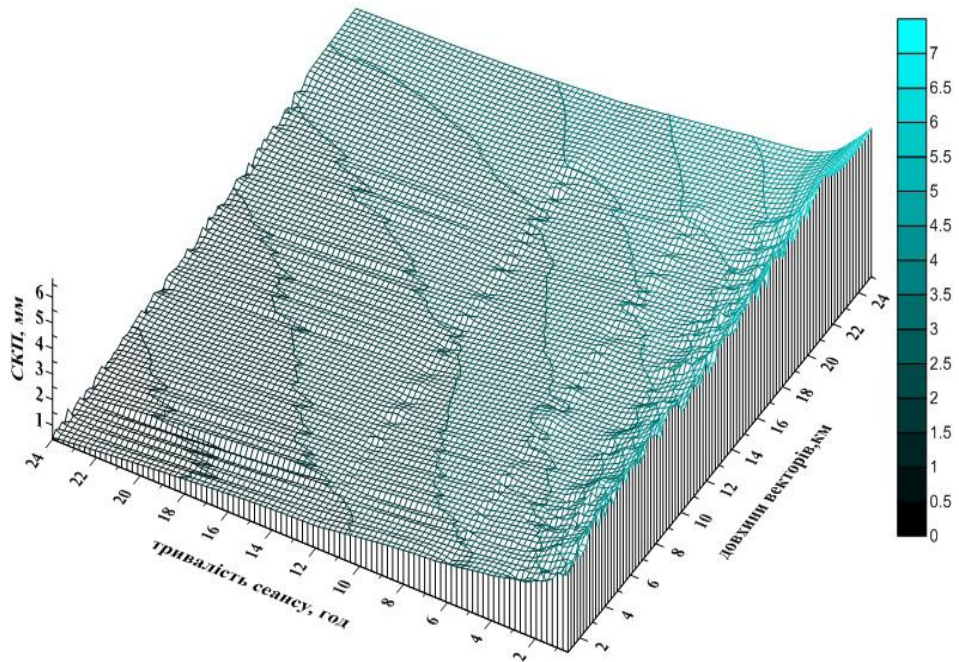
спостережень. Тільки в деяких випадках при віддальх між приймачами меншими від 5 км, рівняння дає дещо занижені результати, а при віддальх більших 20 км – завищені.

Треба зауважити, що в дослідженні використані спостереження на перманентних станціях, де умови спостережень є близькими до ідеальних, тому отримані нами значення СКП є дещо меншими, ніж вони будуть при реальних спостереженнях. Але характер залежності при цьому не зміниться.

Були також побудовані графіки залежності СКП довжин векторів від тривалості спостережень для певних діапазонів довжин векторів відповідно для дво- та одночастотних GPS-приймачів, які наведені у додатку А (рис. А.2). Нагадаємо, що в мережі, яка досліджується, віддалі між одночасно працюючими приймачами змінюються від 1 до 25 км, тому були розглянуті такі діапазони довжин векторів: від 1 до 5 км; від 5 до 10 км; від 10 до 15 км; від 15 до 20 км та від 20 до 25 км. Отже, для побудови даних графіків при всіх тривалостях спостережень були визначені середні значення середніх квадратичних помилок для вказаних діапазонів довжин. Як бачимо, точність визначення довжин векторів погіршується зі зменшенням тривалості спостережень для всіх діапазонів віддалей між пунктами. Крім того, простежується тенденція підвищення точності зі зменшенням віддалей між одночасно працюючими приймачами, тобто значення СКП довжин векторів зменшуються зі зменшенням довжин векторів.

Враховуючи те, що дані дослідження виконувалися для встановлення залежності СКП довжин векторів від віддалі між одночасно працюючими приймачами і тривалості сеансів та необхідності відображення такої залежності за отриманими результатами дослідження, побудована поверхня похибок вимірів відповідно для односистемних двочастотних та одночастотних приймачів (рис. 2.7). Як бачимо, зроблені раніше висновки щодо залежності точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень та довжин векторів підтверджуються.

а) для двочастотних приймачів



б) для одночастотних приймачів

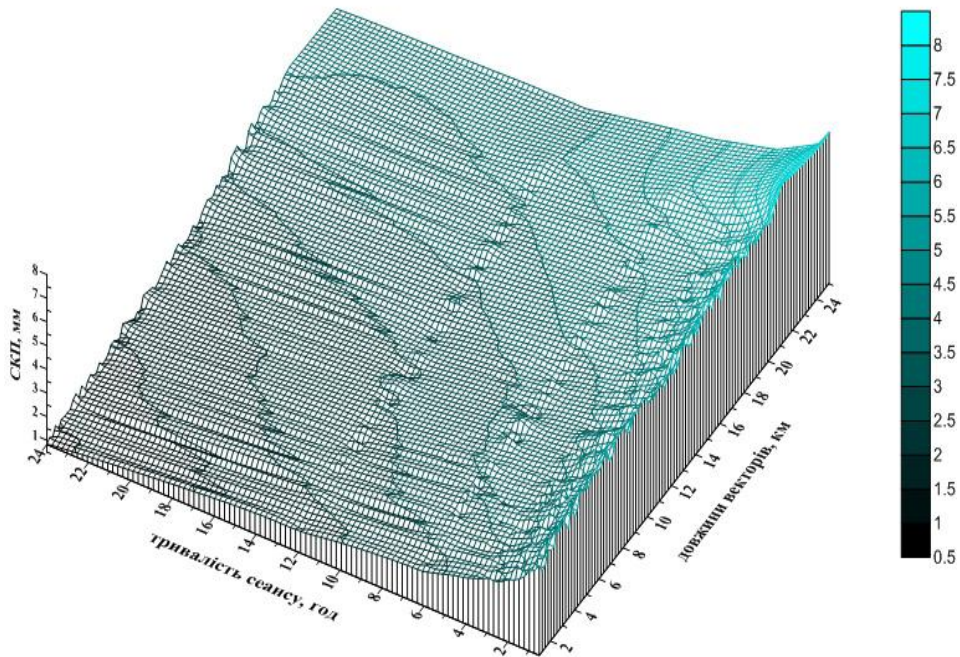


Рис. 2.7. 3D – поверхня залежності СКП довжин векторів від довжин векторів (від 1 до 25 км) та тривалості сеансу (від 0,5 до 24 год) для двочастотних (а) та одночастотних (б) приймачів

Оскільки попередні дослідження виконувалися з використанням даних GPS-спостережень, тому актуальним залишається питання, якою буде точність визначення довжин векторів при тій чи іншій тривалості спостережень та різних довжинах векторів, якщо сумісно використовувати результати ГЛОНАСС та GPS-спостережень. Крім того, важливо виконати апробацію виведених формул (2.8) та (2.9), які отримані суто за результатами GPS-вимірювань. Для вирішення даної проблеми використані результати опрацювання мережі №2.

За значеннями середніх квадратичних помилок довжин векторів, побудовані поверхні залежності СКП від тривалості сеансу (24, 12, 6, 3, 2, 1, 0,5 год) та довжин векторів для двосистемних дво- та одночастотних приймачів, які представлені на рис. 2.8 та рис. 2.9. Для двосистемних одночастотних приймачів розглянуті вектори довжиною від 2,6 до 30 км, тоді як для двосистемних двочастотних такі поверхні побудовані дві – для векторів довжиною від 2,6 до 88,9 км (рис. 2.8) та для векторів довжиною від 2,6 до 30 км (рис. 2.9). Остання побудована для того, щоб мати можливість порівняти її з поверхнею, побудованою для одночастотних приймачів.

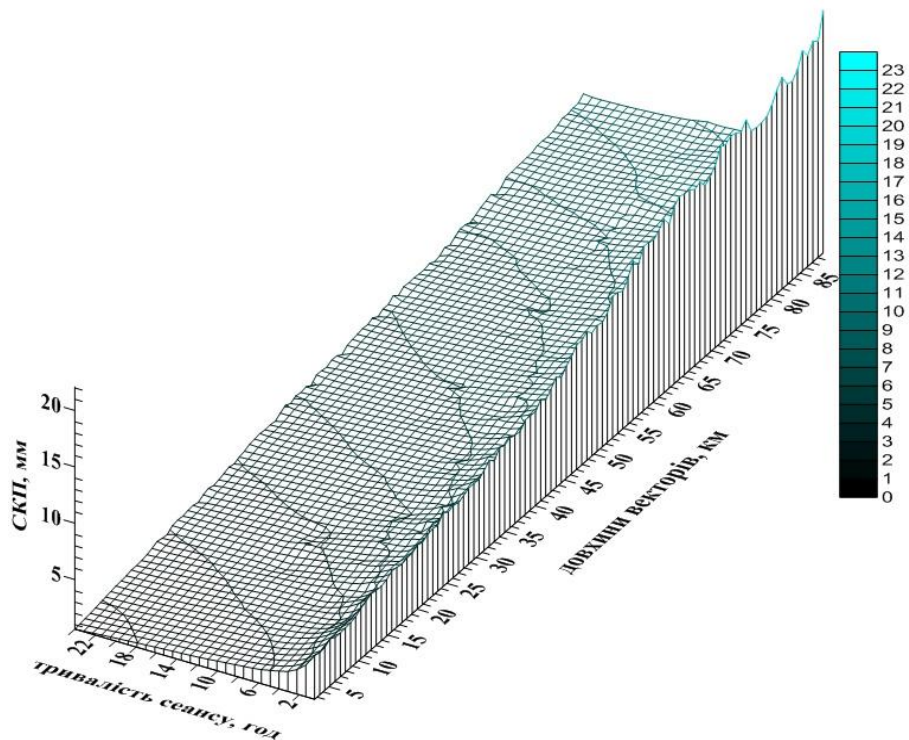
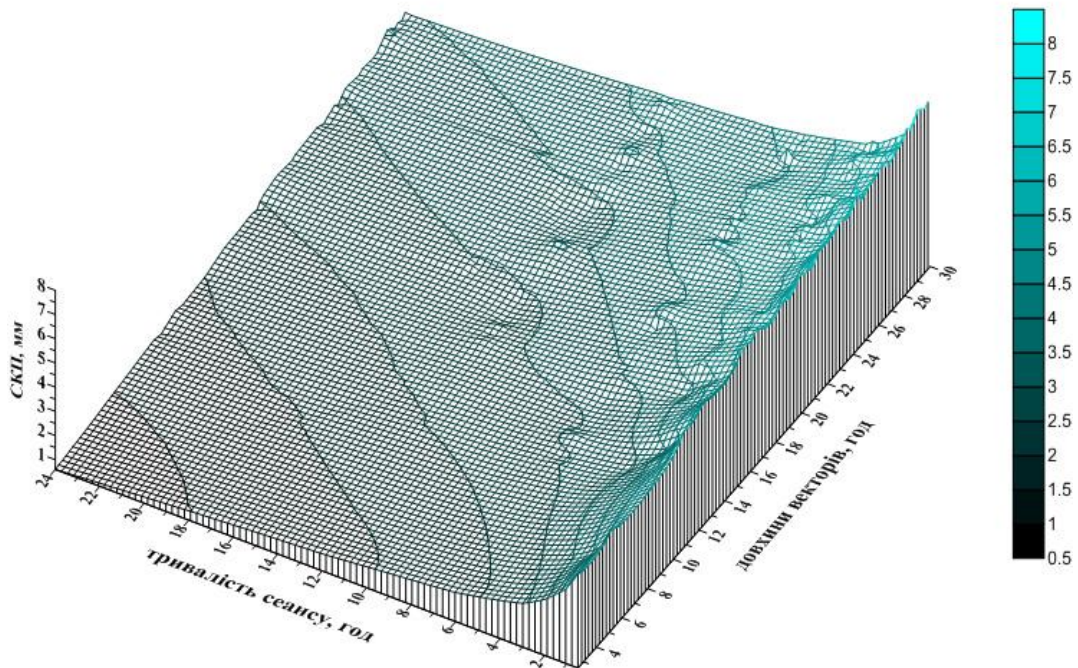


Рис. 2.8. 3D – поверхня залежності СКП довжин векторів від довжин векторів (від 2,6 до 88,9 км) та тривалості сеансів для двосистемних двочастотних приймачів

а) двочастотні приймачі (довжини векторів від 2,6 до 30 км)



б) одночастотні приймачі (довжини векторів від 2,6 до 30 км)

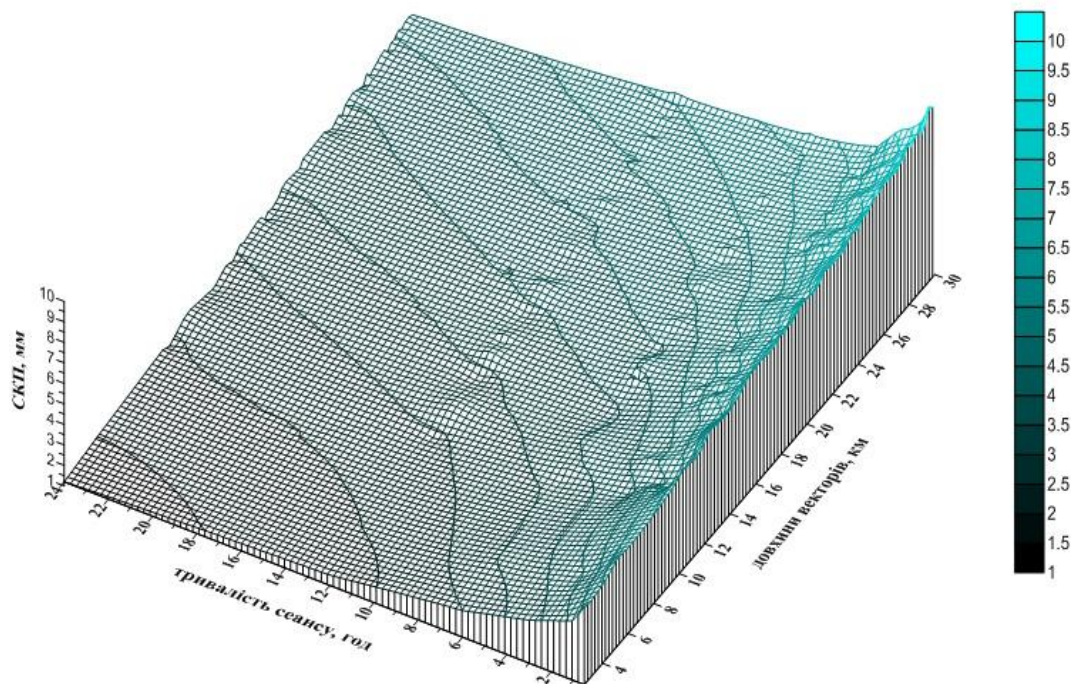


Рис. 2.9. 3D – поверхня залежності СКП довжин векторів від довжин векторів та тривалості сеансу для двосистемних двочастотних (а) та двосистемних одночастотних приймачів (б)

Отже, як вже зазначалося, для двочастотних приймачів СКП обчислені для всіх довжин векторів, тобто від 3 до 89 км, а для одночастотних взяті до уваги параметри векторів від 3 до 30 км. Оскільки на точність результатів спостережень одночастотними приймачами суттєвий вплив має іоносфера, то допускається їх використання лише при коротких довжинах векторів. Як вказано в розділі 1, в багатьох нормативних документах рекомендують використовувати одночастотні приймачі, якщо довжини векторів не перевищують 10 км [23, 45, 99, 151], хоча в деяких джерелах дозволяється виконувати спостереження даним типом приймачів при віддальх до 15 км [8, 92, 98], 20 км [94] та навіть 30 км [22, 127], при цьому необхідно строго дотримуватися встановлених вимог методики спостережень.

Для апробації виведених формул (2.8) та (2.9), обчислені значення СКП довжин векторів при всіх тривалостях сеансів спостережень для дво- та одночастотних приймачів, порівнювалися з СКП, отриманими за результатами спостережень. В табл. 2.13 наведені значення середніх квадратичних різниць при кожній тривалості сеансу спостережень для двочастотних та одночастотних приймачів, а також діапазон зміни значень різниць. Необхідно зауважити, що для двосистемних двочастотних приймачів розглядався 171 вектор (від 2,6 до 88,9 км), а для двосистемних одночастотних лише 49 векторів (від 2,6 до 29,8 км).

Таблиця 2.13

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
$\delta$	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
$\delta$	0,26	0,37	0,39	0,48	0,77	0,85	1,11

Також побудовані графіки за отриманими значеннями СКП довжин векторів для кожної тривалості сеансу та значеннями СКП, обчисленими за

формулами (2.8) та (2.9) для двочастотних та одночастотних приймачів, які наведені у додатку А (рис. А.3 – для двосистемних двочастотних приймачів, А.4 – для двосистемних одночастотних приймачів). Крім того, побудовані графіки залежності точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень для визначених діапазонів довжин векторів, які показані на рис. А.5 (додаток А). В мережі №2 довжини векторів змінюються від 2,6 до 88,9 км, тому їх було поділено на 11 груп, до яких віднесено вектори певної довжини. Різниця між максимальним та мінімальним значенням довжин векторів в групі становить 5 км – для векторів до 30 км, тоді як вектори з довжинами від 30 до 89 км поділені з інтервалом 10 км. Таким чином, були розглянуті такі діапазони довжин векторів: від 2 до 10 км (оскільки векторів для даного діапазону довжин є досить мало), від 10 до 15 км, від 15 до 20 км, від 20 до 25 км, від 25 до 30 км, від 30 до 40 км, 40 – 50 км, 50 – 60 км, 60 – 70 км, 70 – 80 км та 80 – 89 км для двосистемних двочастотних та двосистемних одночастотних приймачів. Як бачимо дані графіки підтверджують наявність тісної залежності точності визначення довжин векторів від тривалості спостережень, а от зв'язок між точністю довжин векторів та їх довжин є слабшим.

Формули (2.8) та (2.9) дають дещо завищені результати, що пояснюється тим, що на етапі їхнього виведення використано результатами лише GPS-спостережень, а довжини векторів змінювалися від 1 до 25 км. Крім того, як відомо, використання у спостереженнях на перманентних станціях додатково супутників системи ГЛОНАСС дещо погіршують точність вимірювань [56, 73]. Така тенденція спостерігається і в результатах, отриманих в цьому дослідженні.

Виконавши апробацію формул (2.8) та (2.9) та детально проаналізувавши отримані результати, можна рекомендувати використовувати формули (2.8) та (2.9) для апріорної оцінки точності супутникових мереж та для встановлення оптимальної тривалості спостережень дво- та одночастотними ГНСС-приймачами. Однак варто зауважити, що дані функціональні залежності необхідно використовувати при довжинах векторів, що не перевищують 30 км та тривалості спостережень від 6 до 0,5 год.



### **2.3. Встановлення залежності точності визначення положення пунктів від тривалості сеансів спостережень, довжин векторів та кількості векторів, які сходяться на пункті**

Побудова та модернізація державної мереж вимагає враховувати сучасний стан супутникових систем та ряд інших факторів, які більшою чи меншою мірою впливатимуть на точність визначення координат пунктів.

До одних з найперших робіт, в яких розглянуті питання створення мереж за допомогою супутникових технологій, можна віднести [107, 134]. Як в [107], так і в [134] є чинники, які враховують при виконанні спостережень, а саме інтервал реєстрації супутникових сигналів, кут відсічки, тип ефемерид. Крім того вихідні пункти розташовувалися по периметру мереж, а їх кількість змінювалася від двох до трьох [107], а в [134] рівна п'яти. Ще один важливий фактор, який враховувався – тривалість спостережень.

В цьому підрозділі розглянуті питання впливу на точність визначення положення пунктів таких чинників, як тривалість спостережень та віддалі між одночасно працюючими приймачами.

Для встановлення залежності СКП положення (координат) пунктів від тривалості сеансів спостережень, довжин векторів, а також кількості векторів, які сходяться в пункті, положення якого оцінюється, використанні результати спостережень протягом двадцяти діб на перманентних станціях, які розташовані на території Швейцарії та приймають сигнали таких двох глобальних супутникових систем, як GPS та ГЛОНАСС. Ці дані, а також координати станцій, взяті з [148], які прийняті в дослідженні за істинні. Картоschema розташування перманентних станцій та схема мережі представлені на рис. 2.9 (червоними кружечками показані використані перманентні станції для формування мережі, а на схемі мережі трикутниками позначені фіксовані пункти). В нормативних документах для супутникових мереж вказується, що при проектуванні мереж система запроєктованих пунктів повинні мати зв'язок не менше як з чотирма пунктами вищого класу, в окремих випадках, достатньо

з трьома. При цьому рекомендується використовувати пункти, які розташовані по периметру мережі [22].

Мережа представлена на рис. 2.10 складається з 23 перманентних станцій та 57 векторів, довжини яких змінюються від 20,2 до 76,6 км. На всіх станціях встановлені двосистемні приймачі Trimble NetR5, а також антени GNSS Choke та Zephyr Geodetic 2.

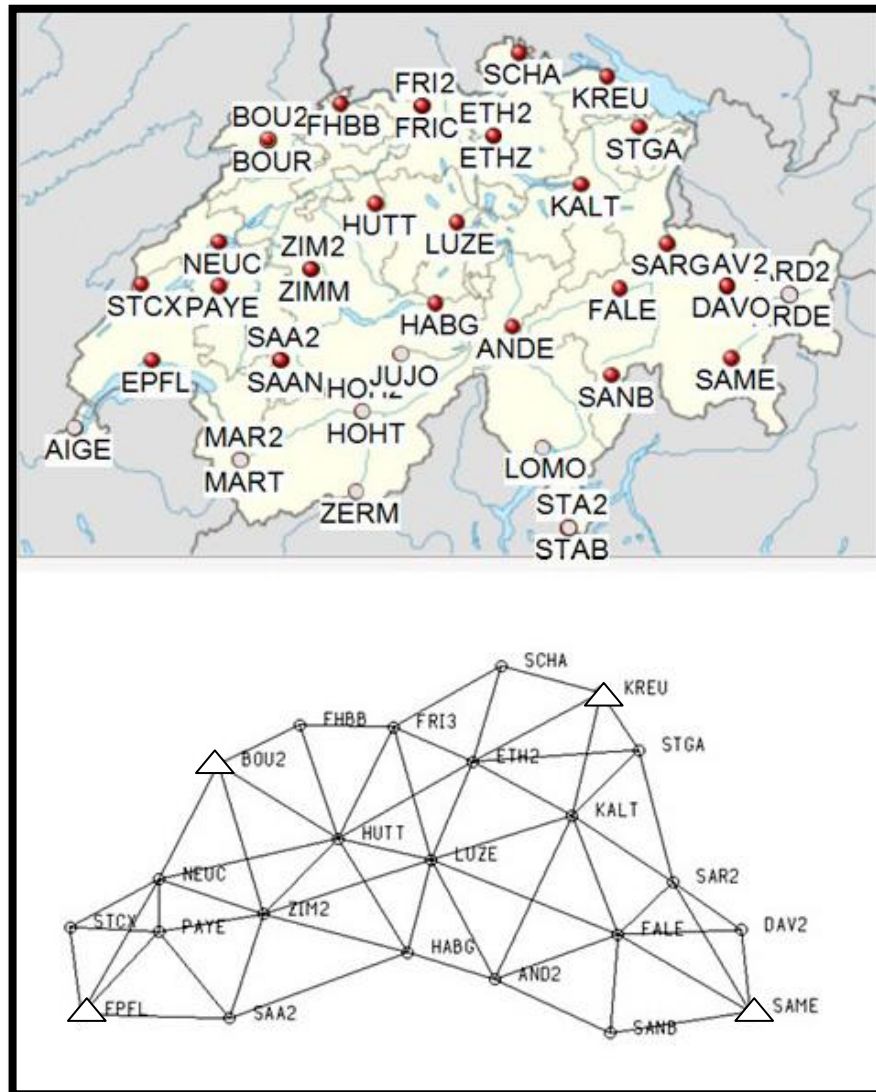


Рис. 2.10. Картоschema розташування перманентних станцій та схема мережі №1

Опрацювання результатів спостережень виконано програмою Trimble Business Center. При цьому використовувалися точні та бортові ефемериди, а кут відсічки встановили рівним  $15^\circ$ . Інтервал реєстрації сигналів приймачами становить 30 секунд. Крім того, за період, за який нами взяті результати спостережень, показник

GDOP є близьким до чотирьох одиниць, тобто геометрія розташування супутників була задовільною при кількості супутників не менше шести.

Сформовані сеанси тривалістю 24, 12, 6, 3, 2, 1, 0,5 та 0,25 год, а саме 20 сеансів тривалістю 24 год, по 40 сеансів тривалістю 12 та 6 год, по 80 – 3, 2, 1, 0,5, 0,25 год. За винятком добових сеансів та половини сеансів тривалістю 12 год, сеанси іншої тривалості сформовані за результатами спостережень проведених вдень. Таким чином загалом отримано 500 сеансів спостережень двосистемними двочастотними приймачами.

Результатом опрацювання є планові координати пунктів, отримані після врівноваження мережі, які порівнювалися з істинними значеннями координат цих пунктів. За різницями координат, отриманими із опрацювання та істинними значеннями, обчислені СКП координат та положення пунктів для кожної тривалості спостережень. Крім того, в мережі для кожного пункту підраховано кількість векторів, які сходяться на ньому, а також визначено середнє значення довжини цих векторів. Отримані результати наведені у табл. 2.14.

Таблиця 2.14

СКП положення пунктів, визначені за результатами спостережень різної тривалості, мм

Назва пункту	Сер. знач. довжини вектора, км	К-сть векторів	Тривалість спостережень, год							
			24	12	6	3	2	1	0,5	0,25
<i>I</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
AND2	50,967	5	3,2	3,5	4,9	6,1	7,0	7,5	10,9	18,7
DAV2	36,777	3	5,5	5,9	6,9	7,8	8,1	9,5	10,4	10,8
ETH2	47,559	7	5,6	6,1	6,7	7,5	8,3	9,1	10,5	14,4
FALE	49,680	7	3,4	4,3	7,0	8,0	8,3	9,1	12,1	16,0
FHBB	38,747	3	3,0	3,5	4,5	6,0	6,5	8,9	9,6	18,2
FRI3	43,293	5	3,0	3,9	5,2	6,0	6,7	8,1	9,8	15,9
HABG	50,301	5	3,0	3,7	5,3	6,3	7,3	9,0	10,7	18,0
HUTT	50,583	8	2,9	3,4	4,6	5,2	5,8	8,1	8,4	11,0
KALT	49,722	7	3,1	3,9	4,5	5,9	6,4	7,4	9,5	14,5
LUZE	52,359	8	5,0	5,4	7,6	8,6	9,5	9,6	12,1	19,0
NEUC	46,664	6	5,0	5,3	8,4	9,2	10,0	10,7	10,8	13,4
PAYE	36,110	4	4,8	5,1	5,8	6,3	6,9	8,1	8,3	10,2
SAA2	53,383	4	5,6	6,1	7,6	8,3	8,8	9,5	11,7	15,6
SANB	46,790	3	3,9	4,5	6,2	7,3	8,2	9,9	12,5	22,2
SAR2	43,433	5	6,1	6,6	6,7	8,3	9,0	10,6	12,3	14,6
SCHA	41,592	3	3,2	4,0	5,7	6,0	7,2	8,0	9,9	17,7
STCX	35,398	3	4,1	4,6	6,7	8,8	9,3	9,7	11,8	15,9

## Продовження таблиці 2.14

1	2	34	5	6	7	8	9	10	11	12
STGA	44,380	4	7,8	7,9	8,8	9,7	9,9	9,9	10,4	13,6
ZIM2	49,864	7	3,5	4,3	4,4	5,9	6,5	8,1	9,0	13,4
середнє	45,663	5	5,3	5,2	6,2	7,0	7,6	8,6	10,1	14,7

З метою встановлення залежності точності визначення положення пунктів від тривалості спостережень, кількості і довжин векторів, які сходяться в кожному пункті, що оцінюється, використано програму STATISTICA, яка призначена для статистичного аналізу даних, а також досвід, отриманий під час встановлення залежностей між точністю визначення довжин векторів, тривалістю спостережень та віддаллю між одночасно працюючими приймачами.

Проведений аналіз впливу кожного фактора на точність положення пункту. Було встановлено, що зв'язок між точністю визначення положення пунктів та тривалістю спостережень найкраще апроксимується натуральним логарифмом. Це підтверджує графік залежності СКП пунктів, отриманих за результатами опрацювання від тривалості спостережень (рис. 2.11).

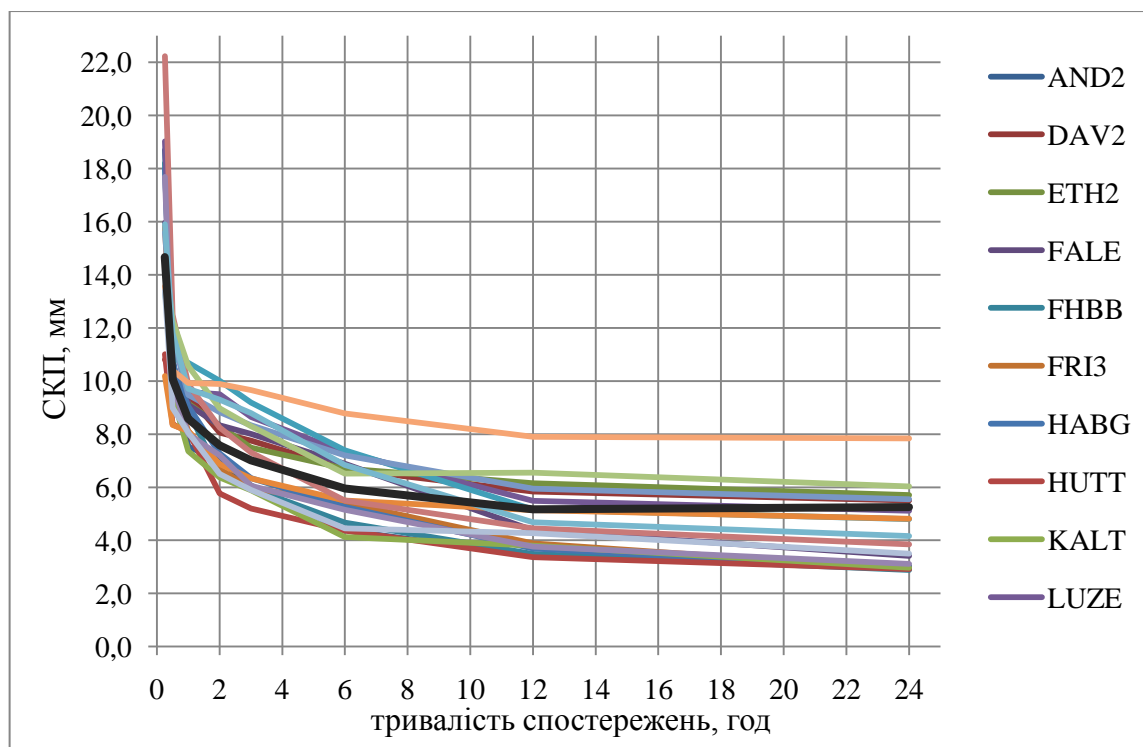


Рис. 2.11. Графік залежності СКП положення пунктів від тривалості спостережень

На рис. 2.11 чорною лінією показані середні значення СКП пунктів, які визначенні для сеансів кожної тривалості. Отже, як бачимо, використання натурального логарифма для зв'язку точності визначення положення пунктів і тривалості спостережень є виправданим.

Використовуючи програму STATISTICA виконано також статистичний аналіз даних представлених у табл. 2.14, отримані результати наведені у табл. 2.15.

Таблиця 2.15

## Результати статистичного аналізу

	Загальна Кількість	Середнє значення	Мінімальне значення	Максимальне значення	Стандартне відхилення
Довжини векторів, км	-	45,663	35,398	53,383	5,575
Тривалість спостережень, год	8	6,094	0,25	24	7,717
Кількість векторів	19	5	3	8	1,750
СКП, мм	152	8,174	2,932	22,228	3,718

Для встановлення функціональної залежності точності визначення положення пунктів від тривалості спостережень в модулі програми було задане рівняння:

$$m = a \cdot S + b \cdot \ln(T) + c/n + d, \quad (2.12)$$

де  $m$  – СКП в мм;  $S$  – середня довжина вектора в км;  $T$  – тривалість спостережень, год;  $n$  – кількість векторів, які сходяться на пункті;  $a, b, c, d$  – коефіцієнти.

В результаті опрацювання отримані значення коефіцієнтів  $a=0,105\pm 0,065$ ;  $b=-1,592\pm 0,106$ ;  $c=3,1\pm 1,3$ ,  $d=3,5$ , які підставлено у рівняння (2.12):

$$m = 0,105 \cdot S - 1,592 \cdot \ln(T) + 3,1/n + 3,5, \quad (2.13)$$

Крім того, в цій програмі можна переглянути таблиці з коваріаціями (табл. 2.16 – covars of parameters) та кореляціями параметрів (табл. 2.17 – correls of parameters).

Таблиця 2.16

## Коваріації параметрів

	a	b	c	d
a	0,001555	-0,000000	0,07885	-0,08847
b	-0,000000	0,011289	0,000000	-0,01011
c	0,078855	0,000000	3,06129	-5,38476
d	-0,088474	-0,010114	-5,38476	3,26494

Таблиця 2.17

## Кореляції параметрів

	a	b	c	d
a	1,000000	-0,000000	0,704222	-0,977692
b	-0,000000	1,000000	0,000000	-0,041485
c	0,704222	0,000000	1,000000	-0,826546
d	-0,977692	-0,041485	-0,826546	1,000000

Крім того, використовуючи програму Surfer побудовано номограму, яка відображає залежність точності положення пунктів від довжини векторів та тривалості спостережень згідно формули (2.13) (рис. 2.12).

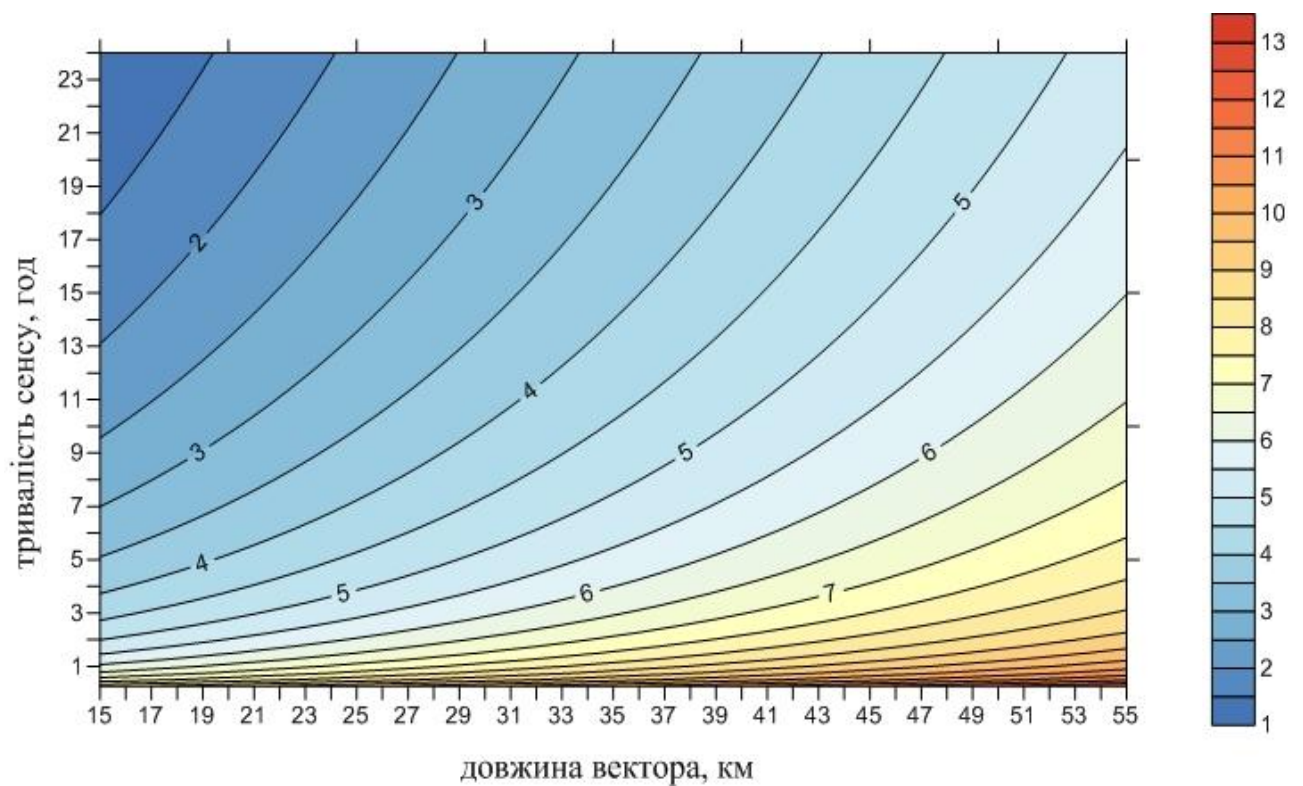


Рис. 2.12. Номограма визначення точності положення пунктів від довжин векторів та тривалості спостережень

Для оцінки отриманої нами залежності, значення СКП положення пунктів при різній тривалості сеансів спостережень, які були обчислені за рівняннями (2.13), порівнювались з СКП, отриманими за результатами спостережень. Обчислені середні квадратичні значення різниць вказують на точність формули (2.13). Крім того, між СКП, які обчислені за формулою та СКП, які отримані за результатами спостережень різної тривалості, обчислені різниці у відсотках для

кожного пункту мережі, а також для кожної тривалості спостережень визначені максимальні, мінімальні та середні значення цих різниць у відсотках. Отримані результати наведені у табл. 2.18.

Таблиця 2.18

Різниці (у відсотках (%)) СКП, отриманих за результатами спостережень та обчислених за формулою (2.13)

Назва пункту	Тривалість спостережень, год							
	24	12	6	3	2	1	0,5	0,25
<i>I</i>	2	3	4	5	6	7	8	9
AND2	28,5	35,8	26,1	21,4	16,2	20,6	2,9	60,1
DAV2	66,3	32,4	25,0	16,8	10,6	12,7	9,9	2,0
ETH2	45,4	21,8	9,8	4,2	6,2	2,4	4,5	29,5
FALE	17,1	16,6	10,5	8,1	3,4	0,6	17,9	40,4
FHBB	16,1	24,5	21,6	12,8	13,5	3,1	0,9	68,5
FRI3	17,9	17,0	9,7	13,6	11,6	6,3	0,7	45,8
HABG	31,9	32,3	18,6	17,1	12,3	3,8	1,4	54,8
HUTT	29,2	34,6	27,8	30,3	28,8	12,0	18,8	3,5
KALT	24,5	25,8	29,3	20,6	21,0	19,8	7,9	27,2
LUZE	15,6	1,2	16,8	13,1	14,8	2,2	15,5	64,1
NEUC	29,5	7,1	38,4	28,2	28,1	19,8	8,2	20,2
PAYE	58,5	24,1	11,6	0,4	1,2	0,6	9,0	0,7
SAA2	16,8	2,3	8,7	2,5	0,5	4,0	6,5	29,1
SANB	10,0	17,1	5,2	5,1	1,1	4,6	18,5	90,8
SAR2	68,5	40,7	14,3	19,7	18,4	21,7	25,6	34,5
SCHA	16,7	19,8	6,1	15,4	7,7	10,1	1,2	59,3
STCX	28,4	7,2	23,7	35,4	30,3	17,7	26,3	52,2
STGA	98,3	58,7	44,0	34,5	26,3	11,1	3,7	21,8
ZIM2	14,9	17,3	29,9	20,7	19,5	12,2	12,7	17,6
<b>середнє</b>	<b>33,4</b>	<b>23,0</b>	<b>19,8</b>	<b>16,8</b>	<b>14,3</b>	<b>9,7</b>	<b>10,1</b>	<b>38,0</b>
<b>макс.</b>	<b>98,3</b>	<b>58,7</b>	<b>44,0</b>	<b>35,4</b>	<b>30,3</b>	<b>21,7</b>	<b>26,3</b>	<b>90,8</b>
<b>мін.</b>	<b>10,0</b>	<b>1,2</b>	<b>5,2</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>

Підраховано кількість пунктів, для яких різниці між СКП, отриманими за результатами спостережень різної тривалості та СКП, які обчислені за формулою (2.13) не перевищують 20%. Кількість цих пунктів, а також їх кількість виражена у відсотках вказується у табл. 2.19. Необхідно нагадати, що загальна кількість пунктів в мережі №1 є рівною 23, з яких чотири є вихідними, тобто даний аналіз виконаний для 19 пунктів мережі.

Таблиця 2.19

Аналіз точності формули (2.13) визначення точності положення пунктів  
мережі №1

Тривалість сеансів, год	24	12	6	3	2	1	0,5	0,25
К-сть пунктів	8	9	10	12	14	17	17	4
К-сть пунктів у %	42	47	53	63	74	89	89	21

Як бачимо, кількість пунктів, для яких виконується поставлена вище умова, перевищує 50% при тривалості спостережень від 6 до 0,5 год, для сеансів тривалістю 12 та 24 год таких пунктів 47% та 42% від загальної їх кількості в мережі, а найменша кількість пунктів (21%) отримана при тривалості сеансу 0,25 год.

Для більш об'єктивної перевірки отриманої формули (2.13) сформовано дві мережі. Для цього використано результати спостережень на перманентних станціях, які розташовані на території Франції і обладнані двосистемними приймачами (тип більшості з них TRIMBLE NetR5), тобто на них приймаються сигнали супутників двох систем GPS та ГЛОНАСС. Дискретність сигналу становить 30 секунд. Ці дані, а також координати станцій взяті з [130]. Перша мережа (мережа №2) сформована за результатами спостережень протягом десяти діб на 11 перманентних станціях, а друга (мережа №3) – п'яти діб на 15 станціях. Мережа №2 складається з 28 векторів довжини, яких змінюються від 13,4 км до 41,1 км, а мережа №3 складається з 39 векторів з довжинами 8,6 – 33,1 км. Картосхема розташування перманентних станцій та схеми мереж представлені на рис. 2.13.



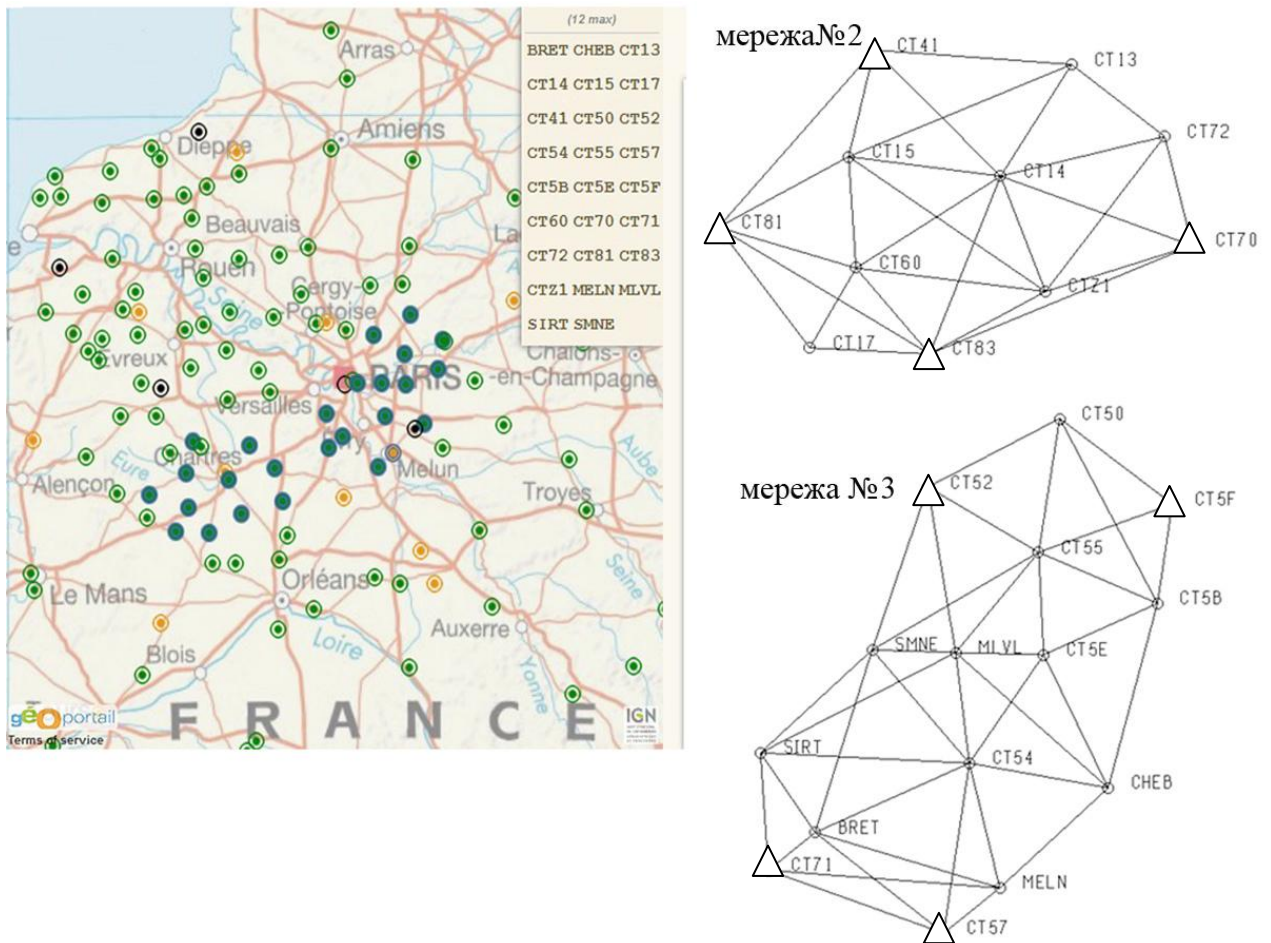


Рис. 2.13. Картоschema розташування перманентних станцій та схеми мереж

Мережі опрацьовані за вже описаною нами вище методикою програмою Trimble Business Center. Використовувалися точні та бортові ефемериди, а кут відсічки встановили рівним  $15^\circ$ . Аналогічно як для мережі, для якої виведена формула, визначено кількість векторів, що сходяться на кожному пункті та середнє значення їх довжини. Отримані результати наведені у таблиці 2.20.

Таблиця 2.20

СКП положення пунктів мережі №2 та №3 визначені за результатами спостережень різної тривалості, мм

Назва пункту	Сер. знач. довжини вектора, км	К-сть векторів	Тривалість спостережень, год							
			24	12	6	3	2	1	0,5	0,25
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
мережа №2										
CT13	24,954	4	4,3	5,2	6,0	6,1	7,0	8,0	9,3	12,3
CT14	24,007	8	2,4	2,6	3,6	4,4	4,4	5,0	6,6	8,5

Продовження таблиці 2.20

<i>I</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CT15	24,242	6	2,5	3,0	4,0	4,4	4,7	5,9	6,1	6,9
CT17	17,593	3	2,0	2,3	3,3	3,9	4,4	5,6	7,3	10,5
CT60	19,897	6	3,9	4,0	5,3	6,2	6,9	7,2	8,7	11,4
CT72	21,586	4	3,0	3,3	4,8	5,1	6,2	7,6	8,4	11,5
CTZ1	25,001	6	2,8	3,1	5,0	5,6	6,3	7,5	8,8	10,0
мережа №3										
BRET	20,764	6	1,1	1,5	2,4	3,6	4,6	4,4	6,2	6,9
CHEB	23,709	5	2,3	4,5	4,7	5,7	6,7	9,0	10,9	12,7
CT5B	21,525	5	3,1	6,0	5,5	5,8	6,9	7,3	9,3	10,4
CT5E	16,968	5	2,1	4,7	4,6	4,3	5,1	5,9	7,4	7,4
CT50	22,625	4	2,4	6,9	4,7	4,7	5,6	4,4	5,8	8,2
CT54	21,606	8	1,4	3,5	4,5	5,1	5,2	6,1	8,5	9,0
CT55	19,586	7	1,3	5,4	3,2	3,7	4,6	4,5	6,3	6,6
MELN	22,058	5	3,1	3,7	4,2	5,5	6,0	7,7	8,1	8,6
MLVL	20,466	7	1,4	2,5	4,1	3,3	4,1	5,2	7,3	8,4
SIRT	22,682	5	1,5	2,2	2,7	3,5	3,7	6,3	8,4	7,7
SMNE	22,367	6	1,9	2,8	3,9	4,4	4,4	7,3	10,4	8,3

Використовуючи формулу (2.13) обчислені СКП положення пунктів, які порівнювалися з СКП визначеними за результатами спостережень, тобто для кожного пункту та кожної тривалості спостережень обчислені різниці між відповідними значеннями СКП. Значення різниць були представлені також у відсотках для чіткої візуалізації виконаного порівняння та його аналізу. Крім того, для кожної тривалості спостережень визначені максимальні, мінімальні та середні значення розбіжностей у відсотках для кожної мережі, які дозволяють встановити можливість використання формули (2.13) для попередньої оцінки точності визначення положення пунктів супутникових мереж. Одержані результати наведені у табл. 2.21.

Таблиця 2.21

Різниці (у відсотках (%)) СКП отриманих за результатами спостережень та обчислених за формулою (2.13) для мережі №2 та №3

Назва пункту	Тривалість спостережень, год									
	24	12	6	3	2	1	0,5	0,25		
<i>I</i>	2	3	4	5	6	7	8	9		
мережа №2										
CT13	73,9	77,4	48,7	18,7	21,0	16,1	16,4	35,2		
CT14	78,6	6,2	1,4	5,5	17,0	21,9	12,1	1,3		
CT15	67,0	15,4	8,0	8,5	13,8	10,0	20,4	21,3		
CT17	52,8	4,7	6,2	15,6	16,4	12,1	2,3	22,4		

Продовження таблиці 2.21

1	2	3	4	5	6	7	8	9
СТ60	36,3	86,7	63,2	42,5	38,1	18,0	20,8	37,2
СТ72	96,5	28,1	30,4	6,6	14,2	16,3	10,0	31,6
СТZ1	77,6	15,7	32,1	14,6	13,9	13,0	13,7	13,1
<b>середнє</b>	<b>69,0</b>	<b>33,4</b>	<b>27,1</b>	<b>16,0</b>	<b>19,2</b>	<b>15,4</b>	<b>13,7</b>	<b>23,2</b>
<b>макс.</b>	<b>96,5</b>	<b>86,7</b>	<b>63,2</b>	<b>42,5</b>	<b>38,1</b>	<b>21,9</b>	<b>20,8</b>	<b>37,2</b>
<b>мін.</b>	<b>36,3</b>	<b>4,7</b>	<b>1,4</b>	<b>5,5</b>	<b>13,8</b>	<b>10,0</b>	<b>2,3</b>	<b>1,3</b>
мережа №3								
BRET	3,1	33,6	29,1	19,0	9,5	28,8	14,6	17,6
CHEB	47,8	71,5	25,6	17,7	20,9	36,2	41,5	43,9
CT5B	74,9	67,1	56,6	26,2	30,1	14,6	24,0	21,6
CT5E	65,9	70,9	52,1	4,9	5,5	0,7	5,7	9,2
CT50	49,5	63,4	22,9	3,5	1,7	34,1	24,7	7,4
CT54	29,6	60,4	35,9	14,8	2,2	1,2	17,8	7,8
CT55	35,5	60,2	3,2	12,2	6,5	24,6	11,7	20,1
MELN	77,7	50,2	17,0	16,8	13,5	19,9	8,1	0,8
MLVL	37,8	16,0	27,1	23,0	18,4	14,9	1,0	1,1
SIRT	3,4	14,6	24,8	27,0	31,0	3,7	11,2	11,0
SMNE	50,0	14,7	11,9	3,6	16,0	14,3	39,8	2,9
<b>середнє</b>	<b>43,2</b>	<b>47,5</b>	<b>27,8</b>	<b>15,3</b>	<b>14,1</b>	<b>17,6</b>	<b>18,2</b>	<b>13,0</b>
<b>макс.</b>	<b>77,7</b>	<b>71,5</b>	<b>56,6</b>	<b>27,0</b>	<b>31,0</b>	<b>36,2</b>	<b>41,5</b>	<b>43,9</b>
<b>мін.</b>	<b>3,1</b>	<b>14,6</b>	<b>3,2</b>	<b>3,5</b>	<b>1,7</b>	<b>0,7</b>	<b>1,0</b>	<b>0,8</b>

Використовуючи дані табл. 2.21 для кожної мережі у відсотках визначена кількість пунктів, для яких отримані різниці не перевищують 20% (табл. 2.22). Кількість пунктів, для яких виконаний аналіз точності формули, в мережі №2 становить сім, а в мережі №3 – 11.

Таблиця 2.22

## Результати аналізу формули (2.13) для мереж №2 та №3

Тривалість сеансів, год	24	12	6	3	2	1	0,5	0,25
мережа №2								
К-сть пунктів	0	4	3	6	5	6	5	2
К-сть пунктів у %	0	57	43	86	71	86	71	29
мережа №3								
К-сть пунктів	2	3	3	8	8	7	7	8
К-сть пунктів у %	18	27	27	73	73	64	64	73

Отже, як бачимо, для мережі №2 кількість пунктів, для яких різниці між СКП, отриманими за результатами спостережень та визначеними за формулою (2.13) не перевищують 20%, є більшою 50% при тривалості спостережень 12, 3, 2, 1 та 0,5 години. Для мережі №3 така умова виконується при тривалості сеансів 3 - 0,25 год.

Проаналізувавши отримані результати можна зробити висновок, що точність формули є недостатньою, щоб використовувати її для попередньої оцінки точності положення пунктів, якщо тривалість сеансів змінюється від 24 до 6 год. Крім того, був запропонований ще один варіант формули:

$$m = \exp(a \cdot S - b \cdot \ln(T) + c/n + d), \quad (2.14)$$

де  $m$  – СКП в мм;  $S$  – середня довжина вектора в км;  $T$  – тривалість спостережень, год;  $n$  – кількість векторів, які сходяться на пункті;  $a, b, c, d$  – коефіцієнти.

Використовуючи програму STATISTICA для мережі сформованої за результатами спостережень на перманентних станціях, що розташовані на території Швейцарії, аналогічно, як і при виведенні формули (2.13), були визначені коефіцієнти  $a=0,019 \pm 0,004$ ;  $b=-0,272 \pm 0,014$ ;  $c=0,3 \pm 0,1$ ,  $d=1,4$ , після цього формула (2.14) набула вигляду:

$$m = \exp(0,019 \cdot S - 0,272 \cdot \ln(T) + 0,3/n + 1,4). \quad (2.15)$$

Також використовуючи програму Surfer згідно формули (2.15) побудовано номограму, яка відображає залежність точності положення пунктів від довжини векторів та тривалості спостережень (рис. 2.14).

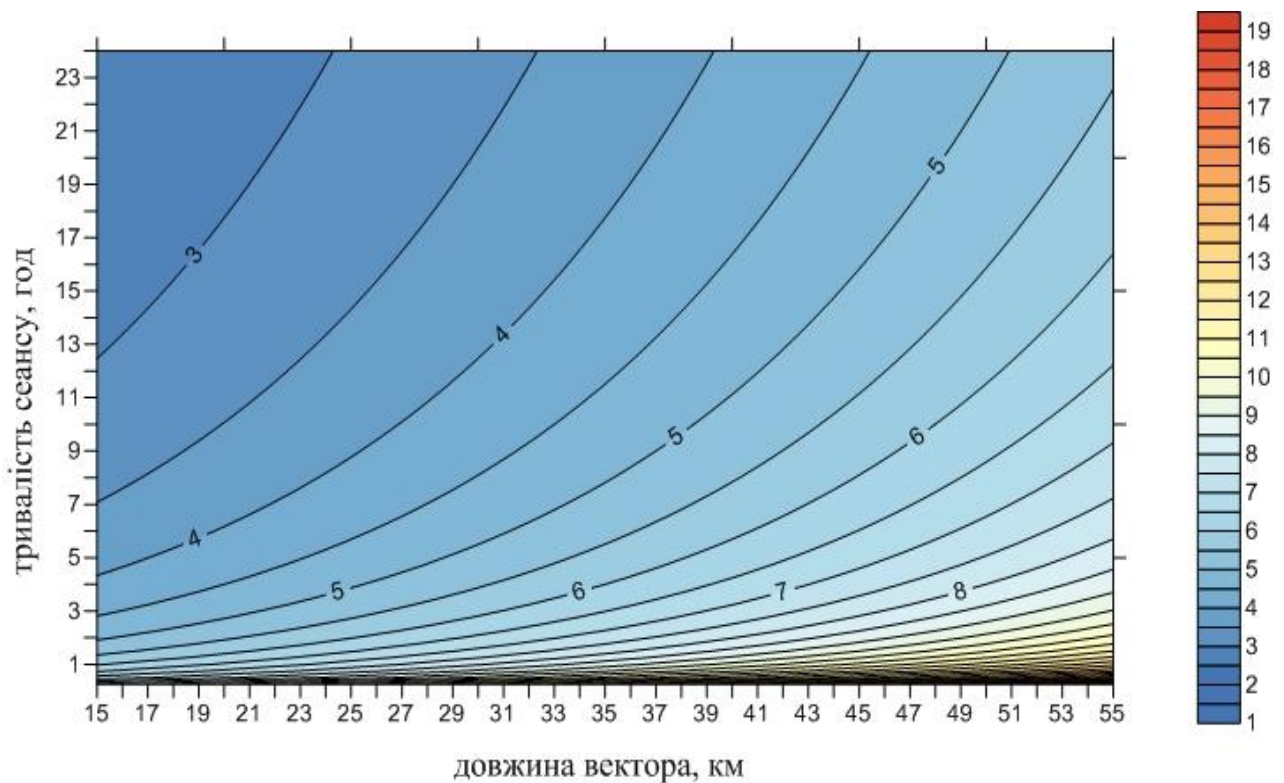


Рис. 2.14. Номограма визначення точності положення пунктів від довжин векторів та тривалості спостережень

Виконаний, аналогічно, як для формули (2.13) аналіз формули (2.15) показав, що точність даної формули є дещо вищою при тривалості спостережень 15 хв, ніж формули (2.13). Тобто для мережі №1, для якої виведена функціональна залежність точності положення пунктів від тривалості спостережень, віддалі між одночасно працюючими приймачами та кількості векторів, які сходяться на пункті, а також мереж №2 та №3 були визначені СКП за формулою (2.15), які порівнювалися з СКП, отриманими за результатами спостережень. Отримані результати для мережі № 1 наведені у табл. 2.23, а для мереж № 2 та №3 у табл. 2.24.

Таблиця 2.23

Різниці (у відсотках (%)) СКП, отриманих за результатами спостережень та обчислених за формулою (2.15)

Назва пункту	Тривалість спостережень, год							
	24	12	6	3	2	1	0,5	0,25
<i>I</i>	2	3	4	5	6	7	8	9
AND2	34,8	39,3	30,7	28,7	26,3	34,5	21,5	11,7
DAV2	45,2	27,5	24,4	15,5	7,4	4,4	4,6	18,2
ETH2	26,4	12,6	2,7	4,7	5,2	13,7	18,0	6,7
FALE	26,9	22,7	2,8	2,1	8,9	17,5	9,2	0,9
FHBB	25,1	26,7	22,0	14,4	16,8	5,8	15,4	32,7
FRI3	29,1	22,5	13,8	18,8	18,6	18,1	17,8	9,7
HA BG	38,0	36,0	23,4	24,5	22,5	20,2	22,2	8,7
HUTT	37,7	39,7	33,2	37,3	37,8	27,6	38,0	32,5
KALT	33,4	31,2	34,2	28,1	30,4	33,5	29,1	10,3
LUZE	2,8	8,8	7,4	0,7	0,8	17,1	13,2	12,7
NEUC	13,2	0,3	30,4	18,2	15,3	1,9	14,4	12,6
PAYE	29,2	14,5	8,3	2,3	5,1	7,3	21,1	20,1
SAA2	9,7	2,2	2,1	7,7	12,6	22,2	20,5	12,2
SANB	14,7	18,5	7,3	10,2	9,3	10,0	5,7	38,9
SAR2	45,8	31,5	9,1	12,6	9,0	6,3	2,4	1,0
SCHA	23,6	21,5	7,0	17,9	12,5	19,5	17,7	22,1
STCX	10,1	2,5	23,2	34,5	27,4	10,0	10,8	23,7
STGA	80,9	51,5	39,1	27,1	16,4	3,2	16,0	9,3
ZIM2	24,8	23,3	34,8	28,2	29,2	27,3	32,9	17,1
<b>середнє</b>	<b>29,0</b>	<b>22,8</b>	<b>18,7</b>	<b>17,6</b>	<b>16,4</b>	<b>15,8</b>	<b>17,4</b>	<b>15,8</b>
<b>макс.</b>	<b>80,9</b>	<b>51,5</b>	<b>39,1</b>	<b>37,3</b>	<b>37,8</b>	<b>34,5</b>	<b>38,0</b>	<b>38,9</b>
<b>мін.</b>	<b>2,8</b>	<b>0,3</b>	<b>2,1</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>1,9</b>	<b>2,4</b>	<b>0,9</b>

Таблиця 2.24

Різниці (у відсотках (%)) СКП отриманих за результатами спостережень та обчислених за формулою (2.15) для мережі №2 та №3

Назва пункту	Тривалість спостережень, год							
	24	12	6	3	2	1	0,5	0,25
<i>I</i>	2	3	4	5	6	7	8	9
мережа №2								
СТ13	44,6	44,8	38,3	16,5	19,7	13,3	9,0	19,4
СТ14	15,1	23,8	12,7	11,6	20,9	25,5	18,6	13,2
СТ15	12,9	13,5	4,5	13,0	16,8	13,5	25,9	30,6
СТ17	24,2	27,8	14,2	16,1	15,2	10,6	3,5	14,9
СТ60	47,7	25,4	37,6	33,3	32,8	14,8	14,8	24,6
СТ72	7,6	2,0	18,1	3,9	13,1	14,8	5,1	19,1
СТZ1	3,9	11,9	17,7	9,2	10,0	8,4	5,3	0,9
<b>середнє</b>	<b>22,3</b>	<b>21,3</b>	<b>20,4</b>	<b>14,8</b>	<b>18,3</b>	<b>14,4</b>	<b>11,8</b>	<b>17,5</b>
<b>макс.</b>	<b>47,7</b>	<b>44,8</b>	<b>38,3</b>	<b>33,3</b>	<b>32,8</b>	<b>25,5</b>	<b>25,9</b>	<b>30,6</b>
<b>мін.</b>	<b>3,9</b>	<b>2,0</b>	<b>4,5</b>	<b>3,9</b>	<b>10,0</b>	<b>8,4</b>	<b>3,5</b>	<b>0,9</b>
мережа №3								
BRET	59,2	54,3	39,6	23,9	12,9	30,9	19,1	25,6
СНЕВ	20,4	31,1	12,7	13,2	18,0	32,1	32,6	27,7
СТ5В	11,6	81,3	37,6	20,6	26,8	11,8	17,6	9,6
СТ5Е	16,7	53,5	26,0	2,0	2,0	0,7	2,4	15,7
СТ50	16,8	98,5	12,3	5,7	0,7	35,2	28,5	16,8
СТ54	47,6	8,0	13,9	6,3	2,9	5,3	10,4	3,7
СТ55	51,5	72,1	14,8	18,9	10,9	27,1	16,2	27,5
MELN	12,7	10,8	3,3	11,8	10,7	16,9	2,3	10,9
MLVL	46,7	22,9	6,2	28,5	22,1	17,9	4,6	8,8
SIRT	47,2	36,1	33,2	30,0	32,7	6,3	4,8	20,5
SMNE	29,6	17,6	2,8	8,9	19,0	10,5	31,3	13,2
<b>середнє</b>	<b>32,7</b>	<b>44,2</b>	<b>18,4</b>	<b>15,4</b>	<b>14,4</b>	<b>17,7</b>	<b>15,4</b>	<b>16,4</b>
<b>макс.</b>	<b>59,2</b>	<b>98,5</b>	<b>39,6</b>	<b>30,0</b>	<b>32,7</b>	<b>35,2</b>	<b>32,6</b>	<b>27,7</b>
<b>мін.</b>	<b>11,6</b>	<b>8,0</b>	<b>2,8</b>	<b>2,0</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>	<b>2,3</b>	<b>3,7</b>

Обчислені різниці представлені у відсотках порівнювалися з відповідними значеннями, отриманими за формулою (2.13). Таким чином встановлено, що кількість пунктів для яких точність формули не є гіршою 20% при тривалості сеансу 0,25 год для мережі №1 зростає на 47%, для мережі №2 – 43%, однак для мережі №3 їх кількість навпаки зменшилася на 9%. Крім того, кращі результати були отримані для сенсів тривалістю 24 год, так для мережі №2 кількість пунктів зростає на 57%, мережі №3 – 18%, а от для мережі №1 кількість пунктів зменшилася на 16%. Кількість пунктів кожної мережі, для яких різниці між

СКП визначеними за результатами спостережень різної тривалості та отриманими за формулою (2.15) не перевищують 20% наведені у табл. 2.25.

Таблиця 2.25

## Результати аналізу формули (2.15)

Тривалість сеансів, год	24	12	6	3	2	1	0,5	0,25
мережа №1								
К-сть пунктів	5	7	9	12	13	13	12	13
К-сть пунктів у %	26	37	47	63	68	68	63	68
мережа №2								
К-сть пунктів	4	3	5	6	5	6	6	5
К-сть пунктів у %	57	43	71	86	71	86	86	71
мережа №3								
К-сть пунктів	4	3	7	7	8	7	8	7
К-сть пунктів у %	36	27	64	64	73	64	73	64

Виведені формули (2.13) та (2.15) залежності СКП положення пунктів від тривалості сеансів спостережень двосистемними двочастотними приймачами, довжин та кількості векторів, що сходяться в пункті, які можна рекомендувати використовувати для апріорної оцінки точності мереж, створених супутниковими методами. Однак, залишається дати конкретну відповідь на питання, яку ж формулу буде доцільніше використовувати (2.13) чи (2.15) та за яких умов. Порахована кількість пунктів, для яких: у першому випадку, розходження між СКП, отриманими за результатами спостережень та обчисленими за формулою (2.13) є меншими, ніж за формулою (2.15) (у таблиці 2.26 результати для кожної мережі наведені у стрічках "ф-ла (2.13)"), а у другому випадку – навпаки, менші розходження отримані при використанні формули (2.15) (у табл. 2.26 стрічки – "ф-ла (2.15)").

Таблиця 2.26

Результати порівняння точності СКП обчислених за формулами (2.13) та (2.15)

№ мережі (загал. к-сть пунктів)		Тривалість спостережень, год							
		24	12	6	3	2	1	0,5	0,25
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
Мережа №1 (19)	ф-ла (2.13)	4	6	4	6	6	7	8	2
	ф-ла (2.15)	7	5	7	5	5	4	3	9
Мережа №2 (7)	ф-ла (2.13)	0	3	2	3	2	2	3	2
	ф-ла (2.15)	7	4	5	4	5	5	4	5
Мережа №3 (11)	ф-ла (2.13)	6	4	3	6	6	7	4	8
	ф-ла (2.15)	5	7	8	5	5	4	7	3

Крім того, СКП мережі №1, обчислені за формулою (2.15) є в 1,02 – 1,47 разів більші за відповідні значення, визначені за формулою (2.13). Для мережі №2 ці значення змінюються від 0,98 до 2,54, а для мережі № 3 – від 1,02 до 3,02. Тому, можна припустити, що формулу (2.15) доцільно використовувати при коротких сеансах спостережень, коли точність отриманих результатів значно погіршується.

Оскільки отримані результати не є однозначними, вирішено виконати ще одне експериментальне дослідження. Для цього використали результати спостережень за одну добу на 15 перманентних станціях, що розташовані на території Швейцарії. На всіх станціях встановлені двосистемні приймачі Trimble NetR5, а також антени GNSS Choke та Zephyr Geodetic 2.

Сформована мережа (мережа №4) складається з 40 векторів довжини, яких змінюються від 20,2 км до 99,4 км. Варто зауважити, що частина пунктів мережі №4 входить до складу мережі №1, однак конфігурація мереж є різною, а також діапазон довжин векторів. Крім того, використані інші добові результати спостережень. Схема мережі представлена на рис. 2.15.

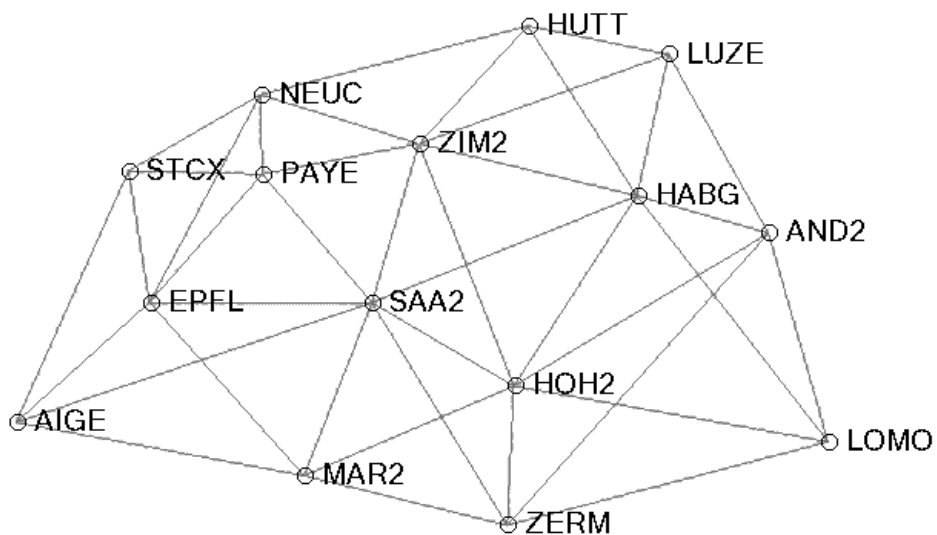


Рис. 2.15. Схема мережі №4

Методика опрацювання мережі №4 є такою ж, як і мереж №1, 2 та 3. Відмінність полягала в тому, що у першому випадку мережа врівноважувалася,



як вільна при всіх сеансах спостережень, а в другому – фіксувалися чотири пункти, які розташовані по периметру мережі (AIGE, LOMO, LUZE, STCX), отримані СКП положення пунктів, кількість векторів, що сходяться на кожному пункті та середнє значення їх довжини наведені у табл. 2.27.

Таблиця 2.27

СКП положення пунктів мережі №4 визначені за результатами спостережень різної тривалості, мм

Назва пункту	Сер. знач. довжини вектора, км	К-сть векторів	Тривалість спостережень, год							
			24	12	6	3	2	1	0,5	0,25
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
вільна мережа										
AIGE	71,157	4	2,2	3,2	4,4	6,8	4,1	5,8	12,9	13,0
AND2	63,267	5	17,2	17,3	17,9	18,7	19,5	18,3	23,5	29,1
EPFL	49,592	6	4,0	4,8	6,9	8,0	9,4	8,3	17,5	19,8
HABG	55,428	7	2,8	3,0	4,6	9,2	9,1	8,3	13,1	13,7
HOH2	59,183	7	5,0	8,1	9,7	12,2	14,3	16,7	29,1	28,9
HUTT	49,494	4	4,1	5,4	6,1	8,9	7,9	8,8	18,0	18,4
LOMO	74,672	4	5,0	5,2	7,0	6,4	11,6	7,8	23,9	26,5
LUZE	48,023	4	2,8	5,5	8,4	12,1	11,2	11,0	13,5	11,2
MAR2	58,173	5	8,2	9,4	10,1	7,7	11,5	14,6	20,0	21,6
NEUC	46,071	5	5,7	5,6	7,3	11,7	10,6	13,5	15,0	19,2
PAYE	36,110	5	4,2	4,4	6,6	7,4	8,7	9,2	14,3	15,3
SAA2	57,942	8	9,2	9,2	9,4	11,6	9,6	12,0	18,9	25,2
STCX	44,049	4	3,0	6,6	7,6	10,3	12,8	11,4	14,7	17,8
ZERM	67,537	5	7,6	8,7	9,6	11,6	9,9	15,5	15,3	13,3
ZIM2	50,706	7	3,6	5,6	7,4	7,0	9,9	9,5	17,1	17,3
мережа з фіксованими пунктами										
AND2	63,267	5	15,7	15,1	15,5	15,7	19,8	14,7	22,6	25,9
EPFL	49,592	6	2,0	3,2	4,2	3,8	4,4	7,3	7,3	8,4
HABG	55,428	7	1,0	2,3	2,6	4,0	4,5	5,8	7,2	6,5
HOH2	59,183	7	3,2	5,2	6,5	7,4	10,0	11,4	15,1	13,9
HUTT	49,494	4	3,2	3,9	4,9	5,6	7,1	5,8	7,0	8,0
MAR2	58,173	5	6,7	7,4	7,7	6,5	9,3	13,1	16,3	14,1
NEUC	46,071	5	4,2	5,6	6,0	7,5	9,3	9,4	12,6	14,2
PAYE	36,110	5	2,8	4,2	4,9	3,2	4,1	4,9	6,1	6,6
SAA2	57,942	8	7,2	8,5	9,4	11,4	13,7	12,5	12,9	13,7
ZERM	67,537	5	4,1	5,4	6,2	7,3	12,2	11,1	10,2	9,4
ZIM2	50,706	7	2,2	3,1	3,7	4,9	4,1	5,8	9,7	10,3

Як бачимо з табл. 2.27 найгіршою є точність визначення положення пункту AND2, що ніяким чином не пов'язано з умовами виконання спостережень, тобто

показник геометричної конфігурації не перевищує чотирьох одиниць, мінімальна кількість супутників, яка спостерігається на пункті – дев'ять. Можливо це пов'язано з технічним станом самої перманентної станції, яка згодом була виведена з експлуатації.

Аналогічно, як для мереж №2 та №3 виконана апробація формул (2.13) та (2.15). Визначені різниці СКП, які отримані за результатами спостережень та обчислених спочатку за формулою (2.13), а пізніше (2.15). Ці різниці (за абсолютною величиною) порівнювалися між собою. Порівнявши значення різниць СКП, отриманих за результатами спостережень і обчислених за формулами (2.13) та (2.15), визначили кількість пунктів кожної мережі, для яких розходження між СКП, отриманих за результатами спостережень та обчислених за формулою, є меншими (по модулю). Отримані результати наведені у табл. 2.28.

Таблиця 2.28

Результати порівняння точності СКП обчислених за формулами (2.13) та (2.15) для мережі №4

№ мережі (загал. к-сть пунктів)		Тривалість спостережень, год							
		24	12	6	3	2	1	0,5	0,25
вільна мережа									
Мережа №4 (15)	ф-ла (2.13)	9	5	4	4	6	6	2	4
	ф-ла (2.15)	6	10	11	11	9	9	13	11
мережа з фіксованими пунктами									
Мережа №4 (11)	ф-ла (2.13)	7	6	9	8	7	8	7	9
	ф-ла (2.15)	4	5	2	3	4	3	4	2

А також порахована кількість пунктів, для яких різниці між СКП визначеними за результатами спостережень різної тривалості та отриманими за формулами (2.13) і (2.15) не перевищують 30%. Для мереж №1, №2, №3 різниці не повинні були перевищувати 20%. Така відмінність зумовлена, зокрема, тим, що у мережі №4 вектори є довшими (середнє значення довжин векторів становить 55,4 км). Отримані результати наведені у табл. 2.29 (кількість пунктів для яких різниці між СКП, визначеними за результатами спостережень різної тривалості та

отриманими за формулами не перевищують 20%: за формулою (2.13) – перед рискою і за формулою (2.15) – після риски).

Таблиця 2.29

## Результати аналізу формули (2.13) та (2.15) для мережі №4

Тривалість сеансів, год	24	12	6	3	2	1	0,5	0,25
вільна мережа								
К-сть пунктів	7/7	8/9	8/11	7/9	9/11	8/12	4/9	4/9
К-сть пунктів у %	47/47	53/60	53/73	47/60	60/73	53/80	27/60	27/60
мережа з фіксованими пунктами								
К-сть пунктів	4/3	6/5	6/6	5/3	5/6	6/6	5/6	6/5
К-сть пунктів у %	36/27	55/45	55/55	45/27	45/55	55/55	45/55	55/45

Проаналізувавши отримані результати можна рекомендувати формулу (2.15) використовувати при тривалості спостережень від 6 до 0,25 години, якщо довжини векторів знаходяться в діапазоні від 15 до 50 км. Формулу (2.13) також можна застосовувати, але найдоцільніше, у разі тривалості сеансів спостережень не менше однієї години і, крім того, як показали результати, отримані для мережі №4 – при довжинах векторів до 70 км.

## ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ

1. Виконано апробацію функціональних залежностей, які раніше виведені іншими дослідниками. Встановлено, що у зв'язку з тим, що ці формули, отримані лише для однієї супутникової системи GPS (основні етапи модернізації якої тільки відбувалися), оскільки система ГЛОНАСС перебувала тільки на стадії формування, виникає необхідність у виведенні нових формул. Крім того, залишилася невирішеною проблема встановлення точності вимірювання довжин векторів одночастотними приймачами.

2. Виведені формули за результатами дослідження залежності точності визначення довжин векторів у мережах, які створюються супутниковими методами від зміни тривалості сеансів спостережень, віддалі між одночасно працюючими приймачами та типу приймачів (дво- та одночастотні).

3. Виконана апробація отриманих нами функціональних залежностей, дає змогу рекомендувати їх використовувати для апріорної оцінки точності довжин векторів, визначених за результатами спостережень двосистемними дво- та одночастотними приймачами при тривалості сеансів від 6 до 0,5 год та віддаль між приймачами від 1 до 30 км. Розходження між отриманими за результатами спостережень та обчисленими за виведеними нами формулами СКП довжин векторів не перевищують 17% для двочастотних приймачів при віддаль до 30 км. При довжинах векторів до 89 км ці значення сягають 45% (тривалість сеансів спостережень 0,5 год) та 24 % (тривалість сеансів спостережень 24 - 1 год). Для одночастотних приймачів розходження між отриманими за результатами спостережень та обчисленими СКП довжин векторів не перевищують 23% при віддаль до 30 км.

Встановлено, що формули можна використовувати при проектуванні супутникових мереж та для встановлення оптимальної тривалості спостережень.

4. За результатами дослідження залежності точності визначення пунктів мереж від тривалості сеансів спостережень, віддалей між одночасно працюючими двочастотними ГНСС-приймачами та кількості векторів, за параметрами яких визначається пункт, виведені функціональні залежності СКП положення пунктів.

5. Виконана апробація та аналіз отриманих формул. Результати підтвердили можливість використання формул для апріорної оцінки точності супутникових мереж та для встановлення оптимальної тривалості спостережень. Розходження між середніми значеннями СКП, отриманими за результатами спостережень та обчисленими за формулою (2.15) не перевищують 21%, а (2.13) – 32% при тривалості спостережень 6 год і менше. Отже, отримана функціональна залежність (2.15) рекомендується для апріорної оцінки точності проектів мереж, створюваних за відносними статичними спостереженнями супутників двох систем двочастотними приймачами при довжинах векторів від 15 до 50 км та тривалості спостережень від 6 до 0,25 год.

Формулу (2.13) доцільно використовувати, якщо тривалість сеансів спостережень змінюється від 6 до 1 год та довжинах векторів до 70 км.

### **РОЗДІЛ 3**

## **ВПЛИВ НА ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ПУНКТІВ КУТА ВІДСІЧКИ, ТИПУ ЕФЕМЕРИД, СПІЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ СИГНАЛІВ СУПУТНИКІВ GPS ТА ГЛОНАСС**

Побудова ГНСС-мереж вимагає врахування існуючої специфіки ГНСС-технологій. До якої необхідно віднести залежність точності супутникових визначень від тривалості спостережень, довжин векторів та інших не менш важливих факторів, результати досліджень впливу яких на точність супутникових визначень, представлені в даному розділі. Оскільки таких чинників є досить багато, а особливо складним є питання їх комплексної дії на точність вимірів, тому основну увагу зосереджено на питаннях залежності точності визначення положення пунктів в супутникових мережах від типу ефемерид, величини кута відсічки, ефективності спільного використання сигналів супутників систем GPS та ГЛОНАСС.

### **3.1. Порівняння точності положення пунктів, визначених використовуючи системи NAVSTAR GPS та ГЛОНАСС**

На сьогоднішній день працюють або вводяться в експлуатацію такі супутникові системи:

- NAVSTAR GPS більш відома як GPS належить міністерству оборони США – єдина повністю сформована та функціонуюча система. Обладнання, яке працює використовуючи сигнали супутників даної системи є найбільш поширеним у світі.
- ГЛОНАСС належить міністерству оборони Російської Федерації. Система, після занепаду у 2002 р., була повністю відновлена до кінця 2011 року. Планується, що до 2025 р. дана система буде удосконалена та модернізована.
- Galileo – європейська система, яка знаходиться на етапі створення.

- BEIDOU (COMPASS) – підсистема ГНСС розробляється Китаєм і призначена для використання тільки в цій країні.
- IRNSS – індійська система, яка знаходиться на стадії розробки. Як передбачається функціонуватиме лише на території Індії.
- QZSS створювалася спочатку як суто комерційна система, яка дозволить вирішувати проблеми мобільного зв'язку, мовлення і використовуватиметься для навігації в Японії і сусідніх районах Південно-Східної Азії [12, 50, 62, 87].

З вище перелічених супутникових систем найбільш прогресивними супутниковими системами вважаються NAVSTAR GPS та ГЛОНАСС, будова яких та принципи роботи мають досить багато, як спільних так і відмінних рис [62]. Як відомо, для того щоб виконання спостережень було можливим, необхідно, щоб одночасно видимими були не менше ніж чотири супутники. Навіть за нормальних умов виконання спостережень, виникає чимало перешкод, які для певних ділянок неба блокують сигнали супутників. Відповідно, більша кількість супутників дозволить отримати якісніші результати вимірювань. І крім того, геометрія розташування супутників стане кращою [4]. Додаткового підвищення точності при спільному використанні GPS і ГЛОНАСС сигналів досягають за рахунок збільшення обсягу виміряних величин та відповідного зменшення залишкових впливів систематичних помилок, що властиві кожній з цих систем окремо. Поряд із зазначеними факторами поліпшується також автономний контроль цілісності сигналів у приймачі, а також забезпечується безперервність і надійність результатів навігаційних визначень.

Отже, спільне використання GPS та ГЛОНАСС є одним з перспективних шляхів розвитку Глобальної навігаційної супутникової системи [17, 38, 49, 78, 101, 104, 108, 115, 117, 146].

Звичайно, використання сигналів супутників двох систем повинно привести до підвищення точності, але обидві системи створювались без взаємних узгоджень та погоджень. Тому є ряд відмінностей у функціонуванні цих систем та опрацювання результатів спостережень, які ускладнюють їх спільне використання

[62]. Назвемо деякі з основних відмінностей, зокрема, відрізняються ці системи кількістю орбітальних площин та кількістю супутників, що рухаються в кожній площині. GPS та ГЛОНАСС використовують різні принципи кодування сигналу. Крім того, є розбіжності в алгоритмі обчислення координат приймачем, в ГЛОНАСС застосовується більш складна модель розрахунків, що у свою чергу вимагає більших потужностей приймаючого обладнання [11].

Супутники ГЛОНАСС на відміну від супутників системи GPS, рухаючись по своїх орбітах, не мають синхронності з обертанням Землі, що забезпечує їх високу стабільність. Однак термін їхньої роботи є досить малим [9, 10, 50, 88].

Необхідно також зауважити, що точність комбінованих точних ефемерид Міжнародної ГНСС-служби (IGS) для супутників приблизно в два рази гірша ніж для GPS-супутників, хоча необхідно звернути увагу і на те, що над усуненням даної проблеми досить активно працюють [146]. Крім того, поправки для годинників супутників ГЛОНАСС не оцінюються IGS, у файли точних ефемерид записуються значення бортових. Точність оцінки поправок годинників GPS-супутників не перевищує 0,1 нс [80]. Певною мірою утруднює спільне використання двох систем також складність перерахунку результатів вимірювань через відсутність офіційно опублікованої матриці переходу між використовуваними системами координат.

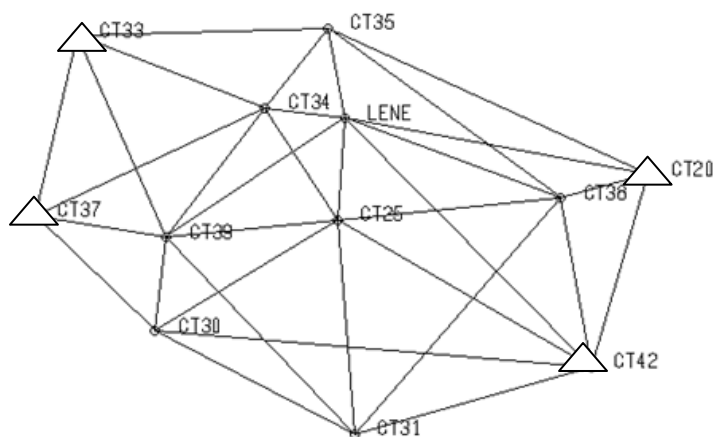
Ці дві системи розроблялися з врахуванням того, де найбільш активно на земній кулі їх використовуватимуть. Так ГЛОНАСС має переваги на високих широтах, тоді як GPS – на середніх [9, 48, 161].

У зв'язку із суперечливими висновками щодо цього питання, а також приймаючи до уваги впровадження у виробництво приймачів, що дозволяють приймати сигнали супутників декількох ГНСС нами були проведені дослідження, в яких використано однодобові результати спостережень на перманентних станціях, що розташовані на території Франції і Швейцарії та приймають сигнали обох глобальних навігаційних супутникових систем NAVSTAR GPS та ГЛОНАСС. Дані взяті з [130] та [148], де також наводяться просторові координати цих станцій, за якими обчислені їх планові координати в проекції Гауса-Крюгера. Вони прийняті за

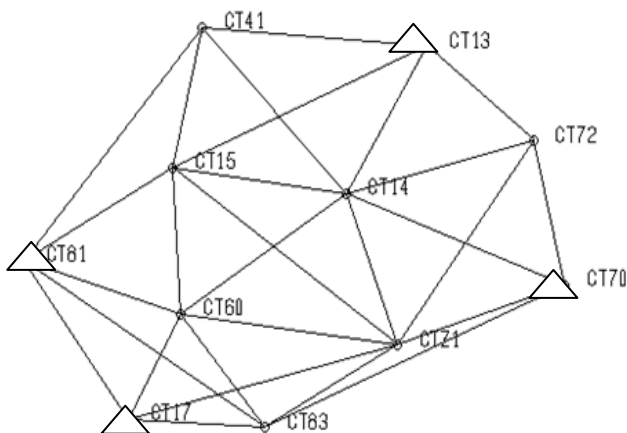
істинні і з ними порівнювались координати пунктів врівноважених супутникових мереж, визначені зі спостережень різної тривалості.

Розглянуто три мережі, які розташовані на території Франції. Перша мережа складається з 12 перманентних станцій та 33 векторів, довжини яких змінюються від 8,6 до 46,7 км. Друга – з 11 перманентних станцій та 28 векторів з довжинами від 13,4 до 41,1 км. І остання мережа складається з 11 станцій, які з'єднані між собою 28 векторами з довжинами від 8,6 до 33,1 км. Отже, як бачимо, кількість станцій, векторів та діапазон довжин векторів для цих трьох мереж є майже однаковим. На більшості станцій встановлені приймачі Trimble NetR5, а також антени Zephyr Geodetic 2. Схема кожної мережі представлена на рис. 3.1 (трикутниками позначені вихідні пункти).

мережа №1



мережа №2



мережа №3

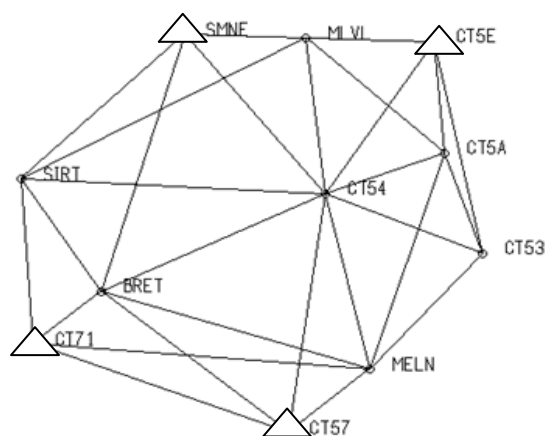


Рис. 3.1. Схеми мереж (Франція)



Крім того, за результатами спостережень на перманентних станціях Швейцарії сформована мережа, яка складається з 23 пунктів та 57 векторів, довжини яких змінюються від 20,2 до 76,6 км. Отже, як бачимо, мережа №4 характеризується значно більшим діапазоном довжин векторів, ніж представлені вище. На всіх станціях встановлені приймачі Trimble NetR5, а також антени GNSS Choke та Zephyr Geodetic 2. Схема мережі №4 з фіксованими пунктами показана на рис. 3.2.

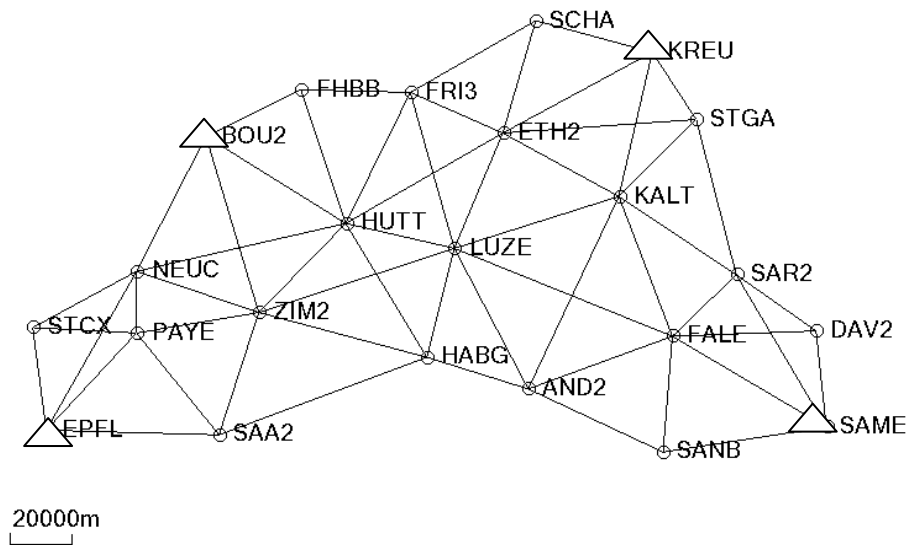


Рис. 3.2. Схема мережі №4 (Швейцарія)

Опрацювання результатів спостережень за однаковою методикою виконано програмою Trimble Business Center. При цьому використовувалися точні та бортові ефемериди, а кут відсікання встановили рівним  $10^\circ$  (для мереж № 1, 2, 3) та  $15^\circ$  (для мережі №4). Інтервал реєстрації сигналів приймачами становить 30 секунд.

Оскільки метою даного дослідження було порівняння точності координат пунктів, визначених з використанням супутників двох систем GPS та ГЛОНАСС, розглянуто два випадки, в яких враховувалися сигнали супутників:

- систем GPS та ГЛОНАСС;
- системи GPS.

Це стало можливим завдяки тому, що програмне забезпечення Trimble Business Center дозволяє відключати ті чи інші супутники.

За допомогою програми RINEX Viewer, яка дозволяє аналізувати результати спостережень, були перевірені всі rinex-файли (результати однодобових спостережень на перманентних станціях з яких сформовані мережі). Отже для першої мережі було завантажено 12 файлів у rinex форматі, другої – 11, третьої – 9, а для останньої – 23 файли. Використовуючи програму, не тільки перевірили якість даних файлів, але визначили максимальну та мінімальну кількість супутників, що спостерігаються від 8 до 21 год. Такі часові рамки пояснюються тим, що крім 24-ох годинних сеансів, всі інші в дослідженні, сформовані за результатами спостережень в денний період доби. На рис. 3.3 для прикладу, показано, як змінюється кількість супутників кожної з систем GPS і ГЛОНАСС та загальна їх кількість протягом доби для одного з пунктів (st41) представлених вище мереж.

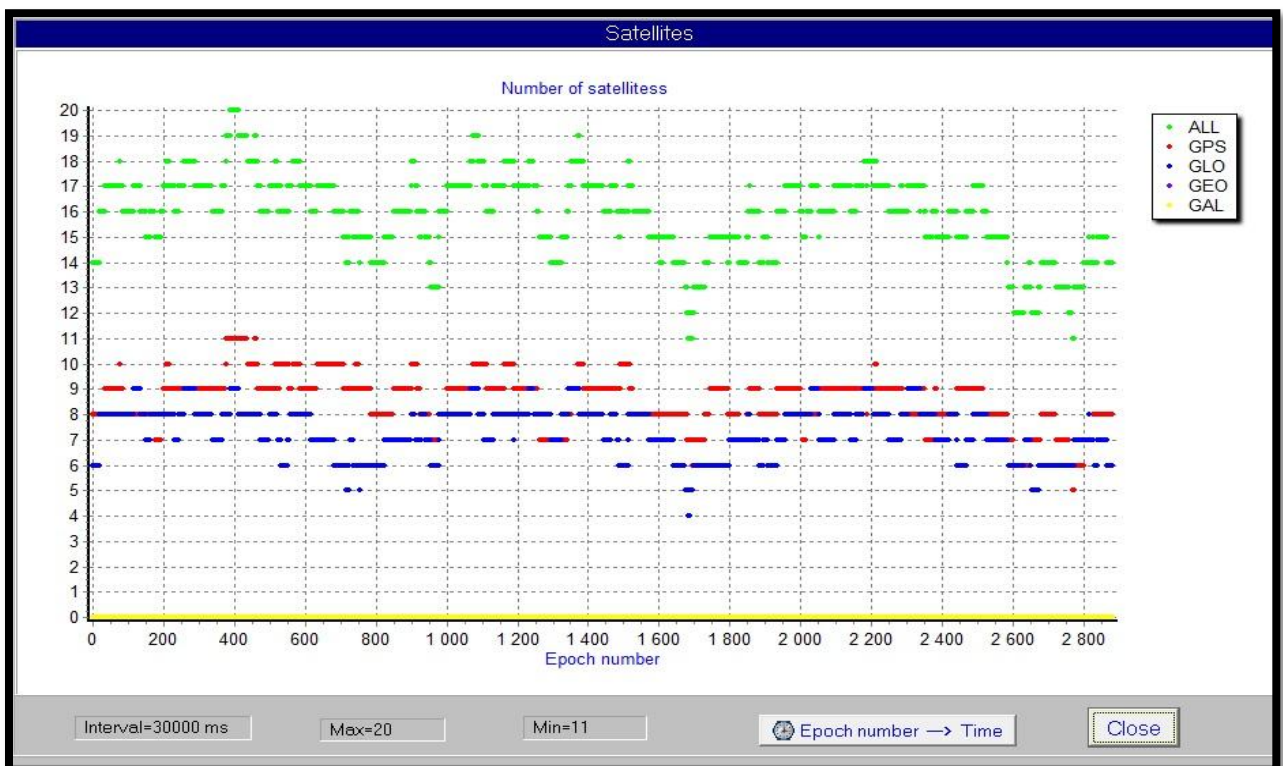


Рис. 3.3. Зміна кількості супутників для пункту st41(мережа №2)

Як бачимо, на рис. 3.3 кількість супутників вказується для певної епохи, час, якому відповідатиме ця епоха, можна визначити використовуючи спеціальну опцію програми.

Отже протягом вказаного проміжку часу встановили мінімальну і максимальну кількість супутників GPS та ГЛОНАСС, які спостерігалися на всіх пунктах кожної мережі. З'ясували, що максимальна кількість супутників GPS, які одночасно спостерігаються на більшості станцій становить 10, лише для пункту lene (мережа №1) їх кількість рівна 11, а для пунктів ct81 (мережа №2), meln, mlvl, sirt, smne (мережа №3) – 12 та ct57, ct5a (мережа №3) – 9 супутників. Найбільша кількість супутників двох систем, сигнали яких одночасно приймає приймач (GPS+ГЛОНАСС) здебільшого рівна 19, тільки для пунктів ct25 (мережа №1), ct81 (мережа №2), meln, mlvl, sirt, smne (мережа №3) їх кількість становить 21, а для пунктів lene (мережа №1) – 20 та ct57, ct5a (мережа №3) – 18 супутників. Також було визначено найменшу кількість супутників, як системи GPS, так і двох систем разом, які одночасно були видимі на пункті. Отже, в більшості випадків видимими є 6 - 7 GPS-супутників, тільки на станціях lene (мережа №1), ct81 (мережа №2), mlvl, smne (мережа №3) одночасно спостерігалось найменше 8 супутників, а на пунктах ct5a, ct57 (мережа №3) – 5. Відповідно найменша кількість супутників двох систем, яка одночасно спостерігалася, рівна 10, лише на деяких пунктах, а таких виявилось сім, спостерігалось від 13 до 16 супутників. Аналогічним чином виконаний аналіз для мережі №4. Найменша кількість супутників двох систем, які одночасно спостерігаються становить 9 для одного з пунктів мережі (НАВГ), а для решти це значення змінюється від 10 до 16. Мінімальна кількість супутників системи GPS становить 4 для станцій SANB, НАВГ, а для інших змінюється від 5 до 8. Максимальна кількість супутників двох систем, які одночасно спостерігаються сягає 24 для десяти пунктів. Найбільша кількість супутників системи GPS становить 16 і спостерігаються вони на чотирьох пунктах мережі – EPFL, FHVB, HUTT, PAUE, на інших станціях їх кількість сягає 11 - 15 супутників. В [108] вказується, що використовуючи одну систему її супутників не повинно бути менше 5, а застосовуючи дві (зокрема GPS та ГЛОНАСС) – не менше 6.

З однодобових спостережень двосистемними двочастотними приймачами сформовано сеанси різної тривалості, а саме 24, 12, 6, 3, 2, 1 та 0,5 год, при цьому

(крім добових сеансів) використані результати вимірювань, проведених вдень. Таким чином, для кожної мережі та вказаних вище двох випадків (використання супутників двох систем та системи GPS) отримано по одному сеансу тривалістю 24 та 12 год, два сеанси тривалістю 6 год та по чотири сеанси тривалістю 3, 2, 1 та 0,5 год. Для мережі №4 сформовані також чотири сеанси тривалістю 0,25 год, а також опрацьовано не один, а два сеанси тривалістю 12 год.

Після опрацювання сформованих сеансів в кожному випадку мережі врівноважувалися за результатами спостережень кожної тривалості. При цьому фіксувались певні пункти, в кожній мережі таких було чотири, які розташовувалися по периметру мережі і їм присвоювались координати відповідних перманентних станцій. Виконавши врівноваження для кожної мережі у двох випадках отримали просторові координати пунктів, які визначені за результатами спостережень. За цими значеннями обчислені планові координати пунктів в проекції Гауса-Крюгера, які порівнювались із відповідними значеннями координат перманентних станцій, що прийняті за істинні. Таким чином були обчислені різниці по  $x$  та  $y$ , і відповідно помилки положення пунктів. В табл. Б.1 (результати вказані для мереж Франції) та Б.2 (результати вказані для мережі Швейцарії) наведені значення помилок, які отримані із сеансу тривалістю 24 год та 12 год, а для сеансів меншої тривалості наведені максимальні значення помилок. Необхідно зауважити, що для мережі №4 максимальні значення помилок вказані також для тривалості 12 год.

Для кожної з чотирьох мереж виконали порівняльний аналіз точності положення пунктів, які визначені використовуючи сигнали супутників одночасно двох систем (GPS+ГЛОНАСС) та окремо системи GPS. Обчислено загальну кількість всіх помилок, які отримані за результатами спостережень різної тривалості, а також пораховано кількість помилок, які задовольняють нерівності  $\Delta_{2\text{системи}} < \Delta_{\text{GPS}}$ ,  $\Delta_{2\text{системи}} < \Delta_{\text{GPS}}$  і рівняння  $\Delta_{2\text{системи}} = \Delta_{\text{GPS}}$  (див. табл. 3.1).

За результатами табл. 3.1, де також у відсотках визначена кількість помилок, що дає змогу проаналізувати якість вимірів, одержаних

використовуючи, як систему GPS, так і разом GPS + ГЛОНАСС, для кожної мережі побудовані діаграми (рис. 3.4).

Таблиця 3.1

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

№ мережі	Загальна кількість помилок	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		

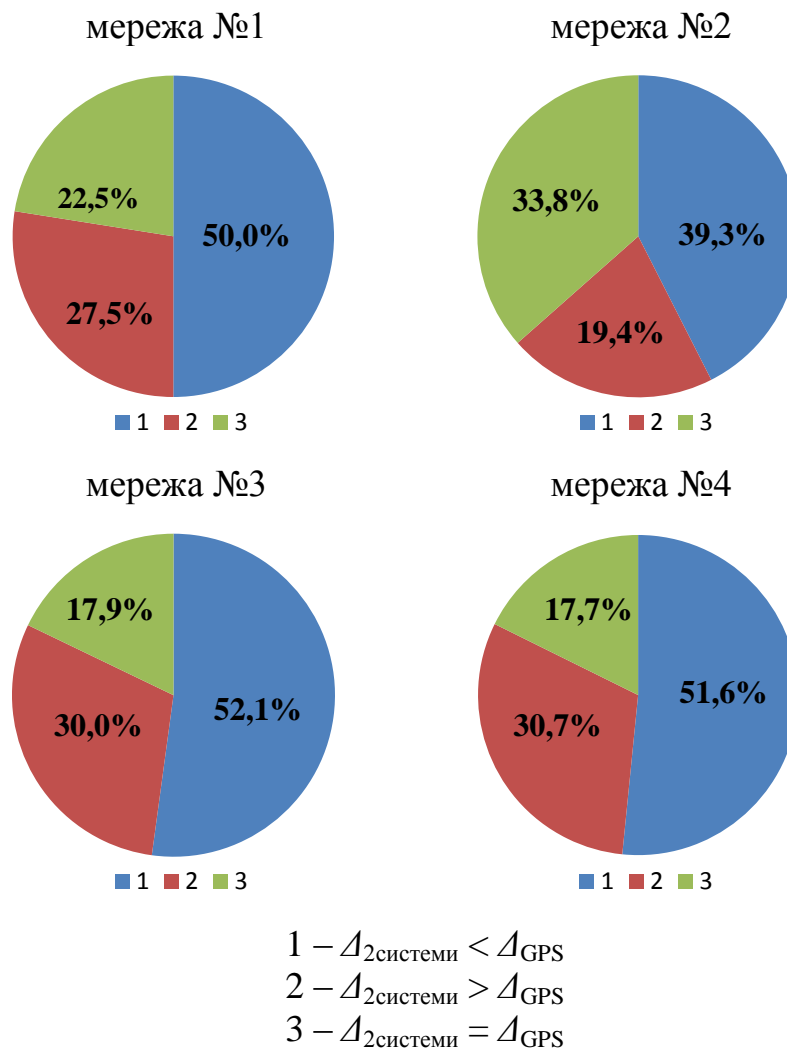


Рис. 3.4. Діаграми розподілу помилок положення пунктів, отриманих за спостереженнями системи GPS та двох систем GPS + ГЛОНАСС

Отже, як бачимо з діаграм порівняння точності положення пунктів, визначених за результатами спостережень супутників двох систем та тільки супутників системи GPS, що 47,3% пунктів разом трьох мереж (мережа №1, мережа №2, мережа №3) визначено точніше при використанні двох систем, 26,1% визначено з однаковою точністю і 26,6% отримано з нижчою точністю. Для мережі №4 відповідно отримали – 51,6%, 17,7% та 30,7%. Тобто, отримані результати показали, що спільне використання двох систем хоча і дозволяє підвищити точність визначення положення пунктів, порівнюючи з системою GPS, проте несуттєво.

Для перевірки гіпотези про рівність дисперсій координат пунктів визначених використовуючи тільки систему GPS та дві системи GPS і ГЛОНАСС, ми використали критерій Фішера, одержані результати підтвердили висновки зроблені вище.

Проте, одночасне спостереження супутників систем GPS і ГЛОНАСС підвищує точність визначення положення пунктів супутникових мереж при коротких тривалостях сеансів спостережень (3 - 0,25 год). На прикладі мережі №4 показано, як змінюється точність визначення положення пунктів зі зменшенням тривалості спостережень, використовуючи одночасно супутники системи GPS та двох систем GPS + ГЛОНАСС (див. табл. 3.2)

Таблиця 3.2

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. 3.2 побудовані діаграми (рис. 3.5).

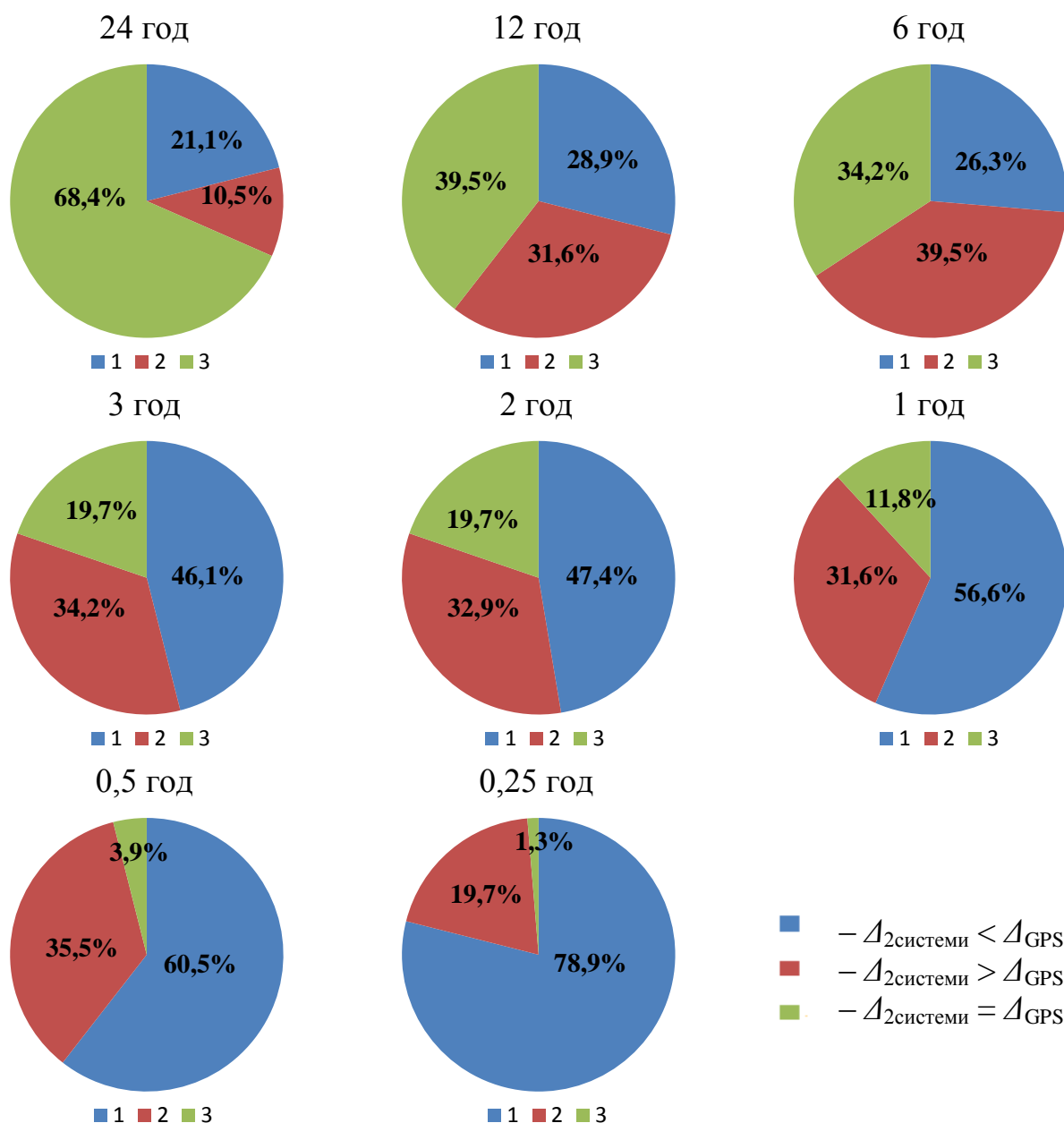


Рис. 3.5. Діаграми розподілу помилок положення пунктів, отриманих за спостереженнями системи GPS та GPS + ГЛОНАСС при різній тривалості сеансів спостережень

Побудовані діаграми підтверджують те, що якість вимірів покращується використовуючи супутники двох систем при зменшенні тривалості спостережень.

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

За останні роки відбулися суттєві зміни в глобальних навігаційних супутникових системах (ГНСС). Системи стали відкритими для цивільного використання, покращилася якість обладнання супутників та збільшилась їх кількість [4]. Зокрема, починаючи з 2010 р. відбувався запуск GPS-супутників нової версії Block ІІF, які мають ряд переваг, однією з яких є стабільність їхніх сигналів, також планується запуснути супутники Block ІІА [3, 84, 123]. Сьогодні космічний сегмент GPS складається з 32 супутників. Що стосується системи ГЛОНАСС, то тільки у 2010 році завершилося формування космічного сегменту і станом на сьогодні нараховується 29 супутників. Номінальна кількість апаратів для першої і другої системи рівна 24 [16, 48, 50, 104]. Відбулося також оновлення та розширення наземного сегменту ГНСС. Сьогодні фірми-виробники пропонують приймачі, які одночасно приймають сигнали двох діючих систем – GPS і ГЛОНАСС і виконують вимірювання віддалей до їх супутників. Завдяки цьому збільшилась кількість визначених приймачами величин [4]. Все це вимагає перегляду основних параметрів методики супутникових спостережень, в тому числі і відносних статичних. Одним з таких параметрів є зокрема кут відсічки, тобто значення висоти супутників над горизонтом, сигнали яких використовуються. Його значення визначене в нормативних документах і встановлюється відповідно до необхідної точності вимірювань. Однак, як і інші параметри методики супутникових спостережень, значення кута відсічки встановлено, коли функціонувала тільки одна система NAVSTAR GPS та коли кількість функціонуючих супутників була меншою, ніж в наш час.

Зменшення значення кута відсічки дає змогу приймати сигнали більшої кількості супутників, тобто отримувати більшу кількість виміряних величин, а це, у свою чергу, підвищує точність вимірювань [110]. Однак, істотне



збільшення кількості діючих супутників при використанні двох і більше ГНСС, дозволяє припустити, що збільшення кута відсічки не буде негативно впливати на точність визначення положення приймача [103]. А це розширює можливості застосування супутникових спостережень в умовах обмеженої видимості супутників, наприклад, в гірських місцевостях або в населених пунктах з висотною забудовою.

Крім того, як відомо, сигнали супутників, які знаходяться близько до горизонту, небажано використовувати у зв'язку з негативним впливом атмосферних явищ на точність вимірів. Рекомендується встановлювати певне значення кута відсічки, яке здебільшого змінюється від  $5^\circ$  до  $10^\circ$  [53],  $15^\circ$  [3]. Однак в інших джерелах, зокрема [71], оптимальний кут відсічки становить  $20^\circ$ , тоді як в [125], вказується, що сигнали супутників, висоти яких є меншими  $10^\circ$ , не беруться до уваги.

Метою проведеного нами дослідження є виявлення впливу зміни кута відсічки на точність визначення положення пунктів супутникових мереж при різній тривалості спостережень односистемними (приймають тільки сигнали системи GPS) дво- і одночастотними приймачами та двосистемними (приймають сигнали систем GPS і ГЛОНАСС) дво- і одночастотними приймачами.

Для дослідження використані результати спостережень на перманентних станціях, які розташовані у північній частині Франції, обладнані двосистемними приймачами (тип більшості з них TRIMBLE NetR5).

Результати спостережень тривалістю шість діб на вибраних перманентних станціях, взяті з [130]. Крім того, з [130] взяті просторові координати станцій, за якими обчислені їх планові координати в проекції Гауса-Крюгера. Вони прийняті за істинні і з ними порівнювались координати пунктів врівноважених супутникових мереж, визначені двосистемними та односистемними дво- і одночастотними приймачами різної тривалості, при різних кутах відсічки. Згідно [90] стан іоносфери протягом цих діб був задовільним.

Зі спостережень сформовані три мережі, схеми яких представлені на рис. 3.6. Перша з них складається з 12 перманентних станцій та 30 векторів з довжинами від 8,6 до 49,0 км. Середнє значення довжин векторів в мережі становить 21,9 км. Друга мережа складається також з 12 перманентних станцій і 33 векторів, довжини яких змінюються від 8,6 до 46,7 км, а їх середня довжина становить 22,7 км. І третя мережа складається з 11 станцій, які з'єднані між собою 28 векторами з довжинами від 13,4 до 41,1 км, середнє значення довжин векторів – 24,1 км. Отже мережі сформовані так, що кількість станцій, векторів та їх довжини є відповідно близькими за цими показниками.

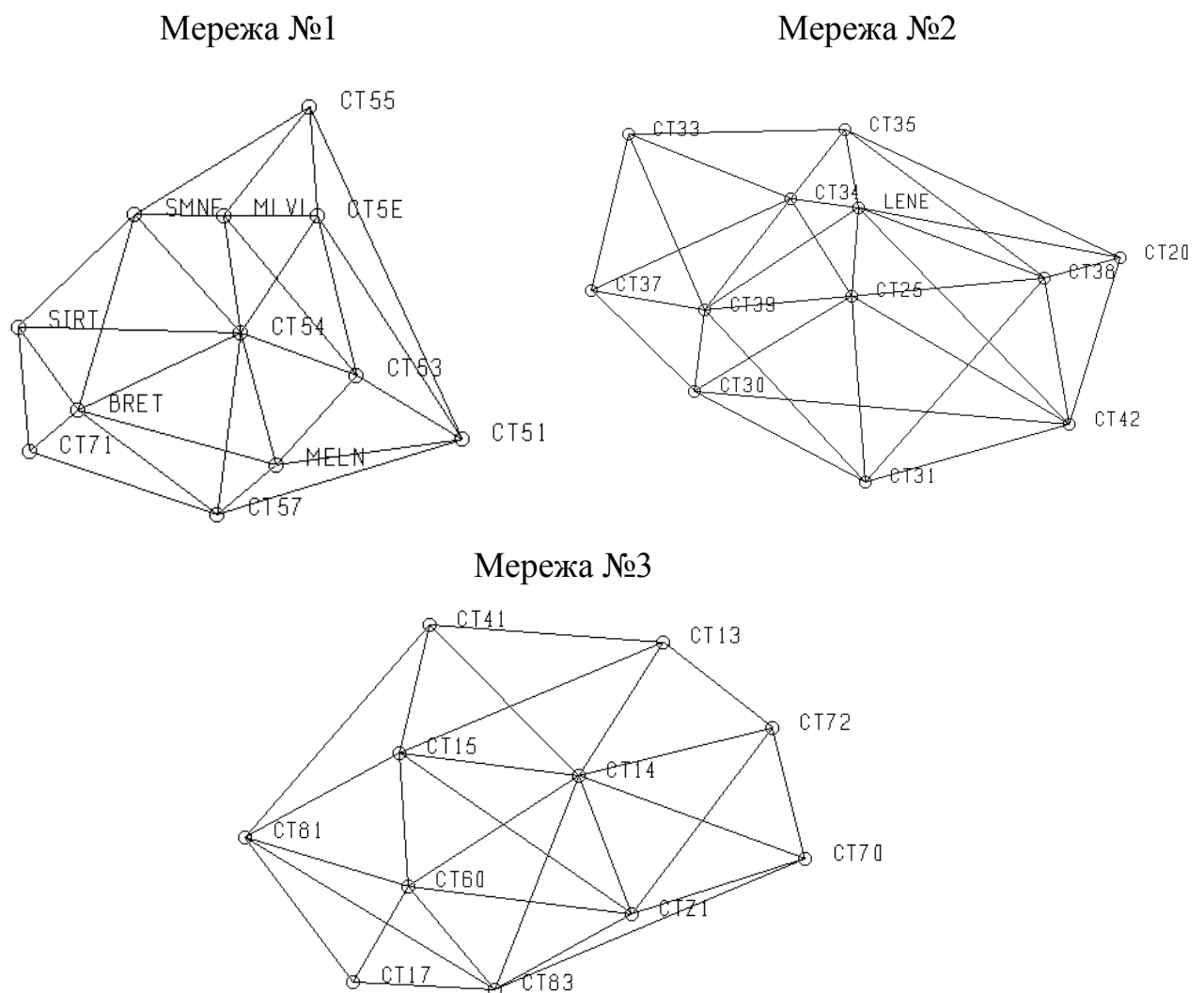


Рис. 3.6. Схеми мереж

Опрацювання результатів спостережень виконано програмою Trimble Business Center, яка дозволяє встановлювати будь-які значення кута відсічки, виключати з опрацювання вибрані супутники, не приймати до уваги результати

спостережень на частоті L2. Ці можливості використано для формування сеансів спостережень різної тривалості двосистемними та односистемними дво- і одночастотними приймачами при різних кутах відсічки. Для опрацювання даних використані бортові та остаточні ефемериди, а дискретність сигналу становить 30 секунд.

За допомогою програмного забезпечення RTKLIV проаналізовані результати спостережень на перманентних станціях протягом шести діб. Визначено загальну кількість супутників систем GPS та ГЛОНАСС, які спостерігаються на кожному пункті з восьмої години ранку до дев'ятої години вечора кожного дня (такий часовий проміжок зумовлений тим, що нами розглядалися сеанси різної тривалості, крім добових, сформовані за результатами спостережень вдень), встановивши кут відсічки рівним  $0^\circ$ . Отже, максимальна кількість супутників двох систем, яка спостерігалася кожного дня становить 20, а мінімальна – 12. На графіку (рис. 3.7), як приклад, для пункту СТ25 показана зміна кількості супутників двох систем з 8:00 до 21:00 год першого дня спостережень.

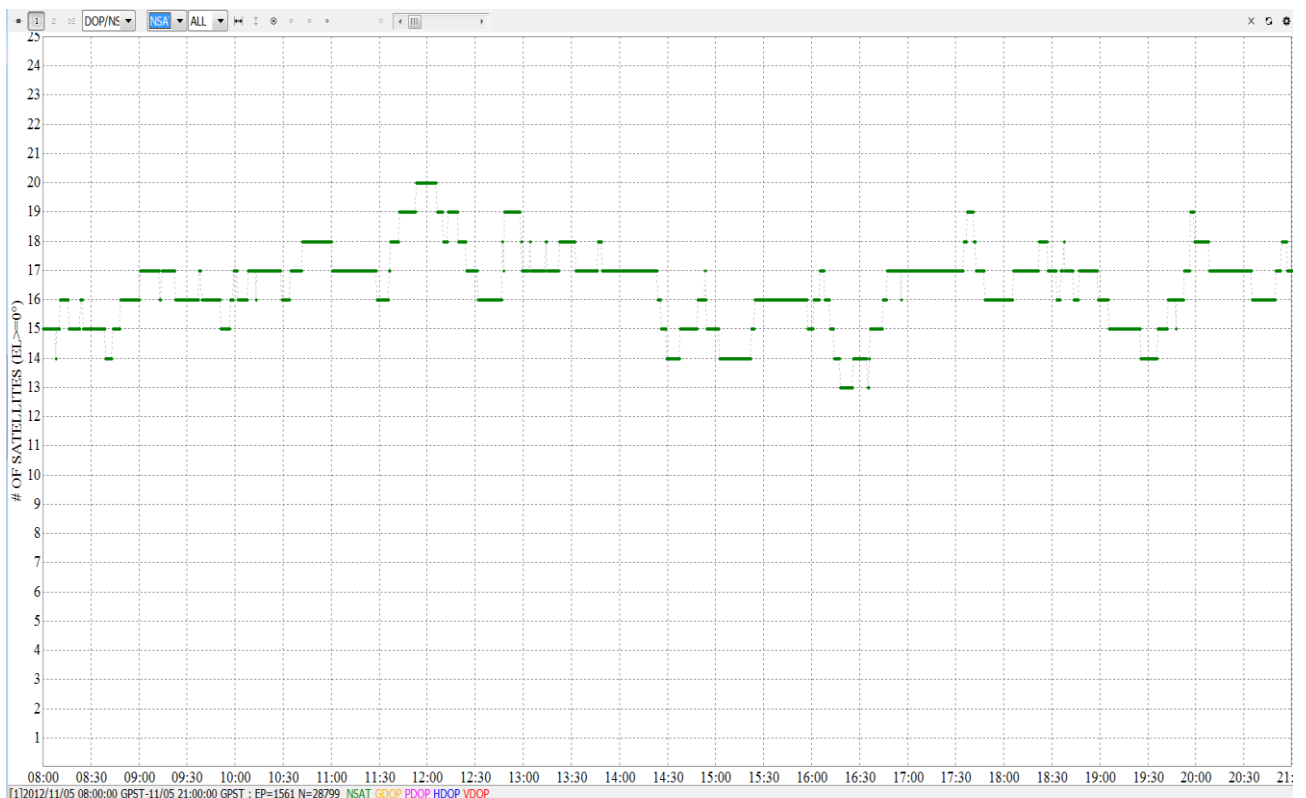


Рис. 3.7. Графік зміни загальної кількості супутників систем GPS та ГЛОНАСС при куті відсічки  $0^\circ$  для пункту СТ25

Максимальна кількість супутників спостерігалася близько дванадцятої години, а мінімальна – шістнадцятої години кожного дня. Варто зауважити, що вказується GPS-час.

Крім того, визначено максимальну та мінімальну кількість супутників кожної системи зокрема, встановлюючи різні значення кута відсічки, а саме: 10°, 15°, 30°, 40°. Протягом шести діб для більшості пунктів кожної з трьох мереж зберігався характер зміни кількості супутників. У табл. 3.3 наведена кількість супутників кожної системи при різних кутах відсічки.

Таблиця 3.3

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

Також проаналізовано залежність показника GDOP від зміни значення кута відсічки для кожної системи зокрема. Отже, при висоті супутників 10° протягом шести діб для системи GPS цей показник здебільшого не перевищував трьох одиниць, тільки для пункту СТ54 він сягнув значення 5,4. Для ГЛОНАСС GDOP не перевищував чотири одиниці для всіх пунктів трьох мереж. При куті відсічки 15°, встановили, що для системи ГЛОНАСС GDOP не перевищує 4,8, тоді як для системи GPS тільки для пункту СТ54 сягає семи одиниць, а для інших пунктів трьох мереж не перевищує 5,5. Якщо при висоті супутників над горизонтом 30° для системи GPS є окремі випадки, коли показник GDOP перевищує 10 одиниць, то при збільшенні висоти розташування супутників до 40° кількість таких випадків зростає. Для системи ГЛОНАСС показник геометричного погіршення точності, навпаки, тільки в деяких випадках не перевищує 10 одиниць при висоті супутників над горизонтом 30°, а при куті відсічки 40° цей показник є більшим ніж 24 одиниці. Оскільки протягом шести діб для більшості пунктів кожної з трьох мереж суттєвих змін кількості супутників та показника геометричного погіршення

точності не було, то для візуалізації отриманих результатів побудовані графіки для одного центрального пункту однієї з мереж. На рис. 3.8 показано, як змінюється кількість супутників кожної системи та показник GDOP для пункту СТ54 (мережа №1) при куті відсічки  $10^\circ$  п'ятого дня спостережень, а на рис. 3.9 – при куті відсічки  $30^\circ$ .



Рис. 3.8. Графіки зміни супутників систем GPS (а) та ГЛОНАСС (б) при куті відсічки  $10^\circ$  для пункту СТ54

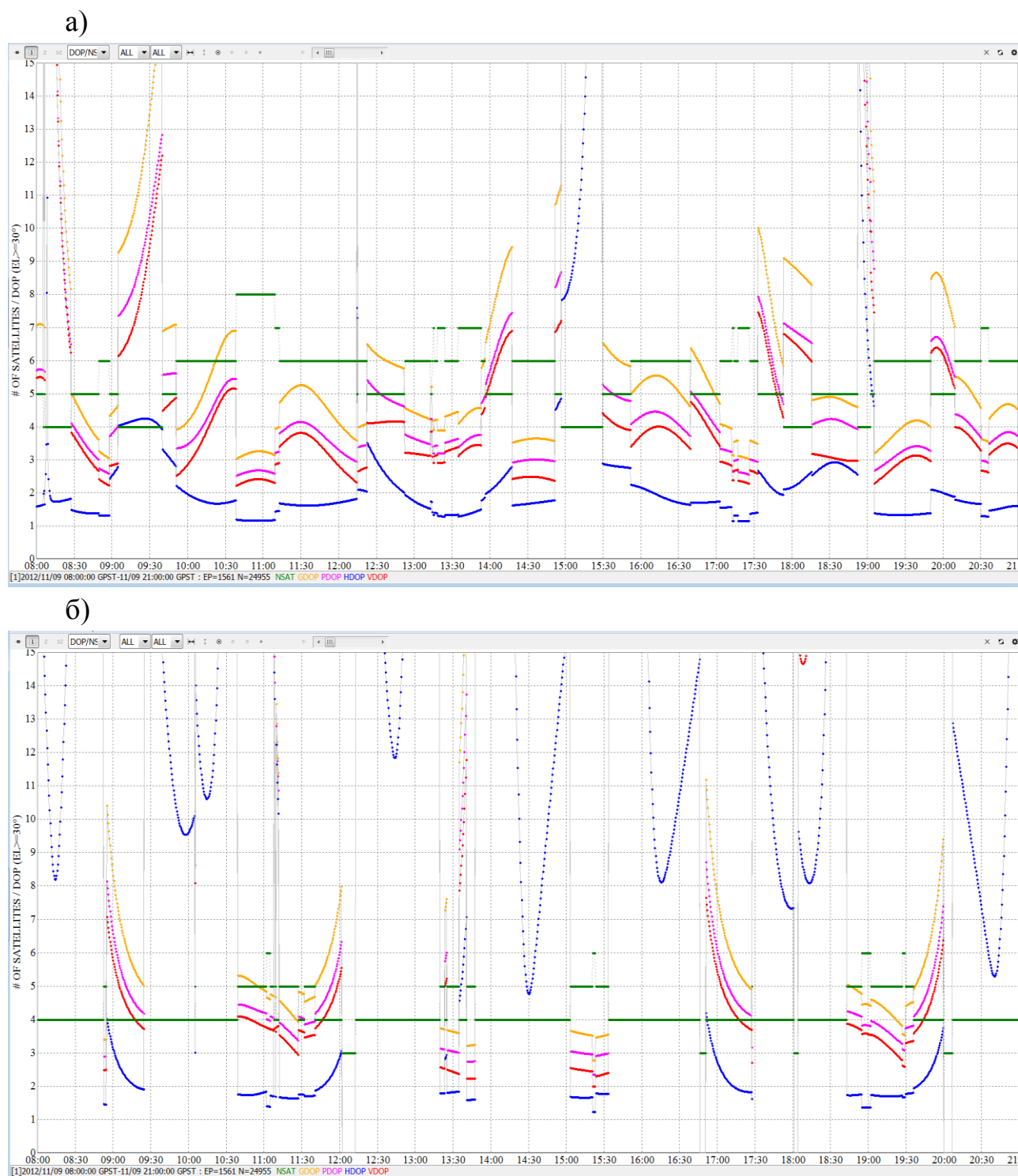


Рис. 3.9. Графіки зміни супутників систем GPS (а) та ГЛОНАСС (б) при куті відсічки  $30^\circ$  для пункту СТ54

Недоліком використаної програми є те, що переглядати кількість супутників та зміну показника GDOP при зміні значень кута відсічки можна лише для кожної системи зокрема. Однак, загалом, можна стверджувати, що умови спостережень будуть забезпечувати необхідну точність визначення положення пунктів навіть при куті відсічки  $30^\circ$ , якщо будуть

використовуватися одночасно сигнали супутників двох систем, а також буде враховуватися, як бачимо, з представлених вище графіків, в який проміжок часу протягом дня виконуватимуться спостереження.

Для кожної мережі сформовано по шість сеансів спостережень дво- і одночастотними приймачами сигналів супутників системи GPS тривалістю 24 і 12 год, по дванадцять сеансів тривалістю 6 год та по двадцять чотири сеанси тривалістю 3, 2, 1, 0,5 і 0,25 год. Сеанси вказаної вище тривалості опрацьовано в семи варіантах, тобто встановивши певне значення кута відсічки, а саме: 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 30° і 40°.

Крім того, для порівняння такі ж сеанси були сформовані із результатів спостережень супутників двох систем (GPS і ГЛОНАСС). Таким чином для трьох мереж при кожному куті відсічки опрацьовано по 72 сеанси спостережень двосистемними приймачами та такої ж кількості односистемними приймачами за одну добу. В результаті для кожної з трьох мереж сформовано 672 сеансів, відповідно за шість діб загальна кількість сеансів становить 12096.

Результатом опрацювання є планові координати пунктів трьох мереж. Для оцінки впливу кута відсічки на точність положення всіх пунктів трьох мереж, створених за результатами спостережень тільки системи GPS та двох систем, порівнювалися отримані планові координати пунктів трьох мереж з їх істинними значеннями. За різницями координат обчислено за формулою Гауса СКП координат всіх пунктів  $m_x$  і  $m_y$ , які використані для визначення СКП положення пунктів за формулою 3.1 при кожному із кутів відсічки для кожної тривалості сеансів спостережень супутників двох систем і тільки системи GPS.

$$M = \sqrt{m_x^2 + m_y^2}. \quad (3.1)$$

Межі зміни СКП ( $\Delta$ ) та середні значення СКП положення пунктів кожної мережі зокрема отримані за спостереженнями супутників систем GPS і ГЛОНАСС, а також супутників тільки системи GPS наведені в табл. Б.3 (додаток Б). Тоді, як в табл. 3.4 наведені більш узагальнені результати, а саме середні значення СКП положення пунктів разом трьох мереж для всіх комбінацій тривалості сеансів та кута відсічки при спостереженнях супутників

тільки системи GPS та супутників двох систем двочастотними та одночастотними приймачами.

Таблиця 3.4

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
<b>Двочастотні приймачі</b>							
<b>Система GPS</b>							
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
<b>Системи GPS+ГЛОНАСС</b>							
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
<b>Одночастотні приймачі</b>							
<b>Система GPS</b>							
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
<b>Системи GPS+ГЛОНАСС</b>							
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



За даними табл. 3.4 побудовані графіки (рис. 3.10 та рис. 3.11) залежності точності визначення положення пунктів від кутів відсічки при різній тривалості спостережень дво- та одночастотними приймачами для однієї системи GPS та спільно GPS+ГЛОНАСС.

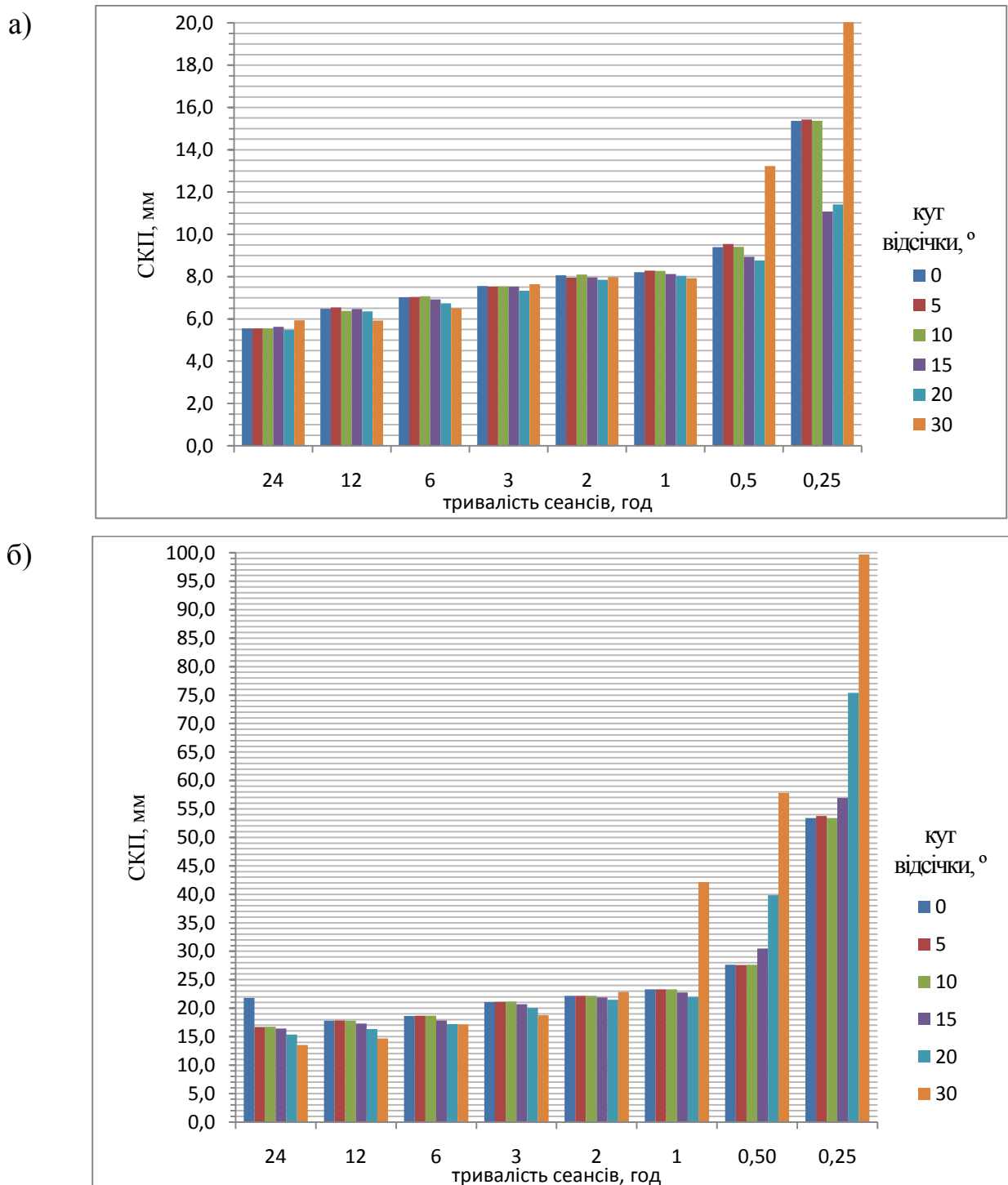


Рис. 3.10. Графіки залежності точності положення пунктів від кута відсічки ( $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ) при різній тривалості спостережень односистемними двочастотними (а) та одночастотними (б) приймачами

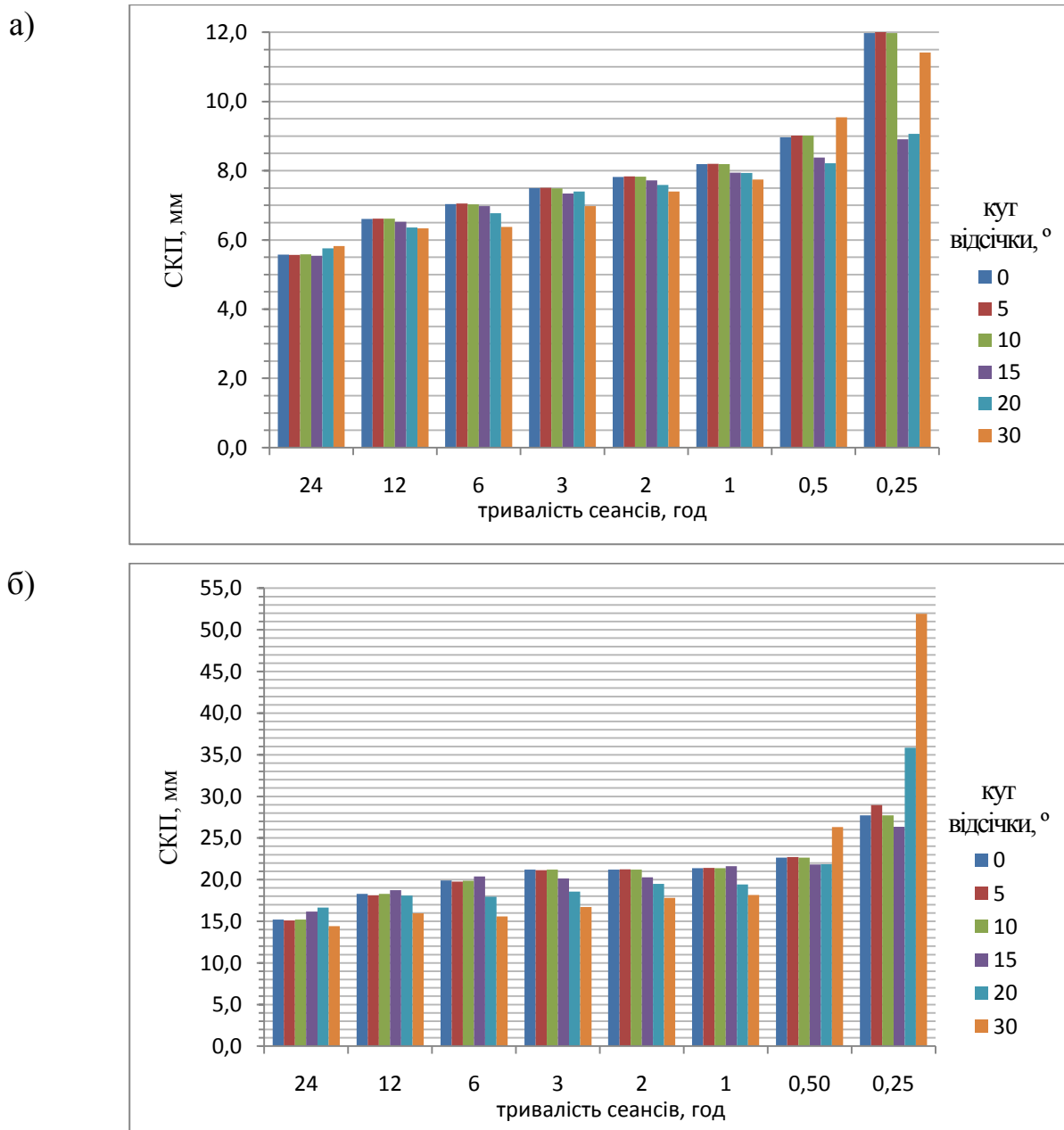


Рис. 3.11. Графіки залежності точності положення пунктів від кута відсічки ( $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ) при різній тривалості спостережень двосистемними двочастотними (а) та одночастотними (б) приймачами

Необхідно також зауважити, що графіки побудовані для кутів відсічки рівних  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ , оскільки СКП положення пунктів, визначені для кута  $40^\circ$ , особливо при коротких сеансах спостережень, сягають максимальних значень, що унеможливорює коректне відображення зміни точності при вказаних вище кутах відсічки.

Отже, як бачимо (див рис. 3.10 та 3.11), простежується певна залежність точності визначення положення пунктів при різних кутах відсічки від тривалості сеансів спостережень. Для того щоб чітко сформулювати певні висновки, нами виконаний детальний аналіз максимальних значень СКП. В табл.3.5 виписані кути відсічки при яких максимальні СКП положення пунктів трьох мереж мають найменше і найбільше значення за результатами спостережень супутників тільки системи GPS дво- і одночастотними приймачами.

Таблиця 3.5

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

№ мережі	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
<b>min</b>																
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
<b>max</b>																
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

Як бачимо, у сеансах спостережень кожної тривалості обома типами приймачів, найменша точність положення пунктів спостерігається здебільшого при куті відсічки 40°.

При тривалості спостережень 24 год двочастотними приймачами для першої мережі найвищою точністю положення пунктів є для кутів відсічки 0° та 10°, для другої мережі найкращі результати отримані, якщо кут відсічки рівний 20°, а для третьої мережі – 40°. За результатами спостережень від 12 до 1 год мінімальні СКП отримані, здебільшого, для кутів відсічки від 20° до 30°. Найменші значення СКП пунктів одержані за результатами спостережень тривалістю сеансів 0,5 год і 0,25 год при кутах відсічки 5° і 20°, збільшення кута відсічки спричиняє значне погіршення точності положення пунктів.

За результатами спостережень тривалістю від 12 до 2 год одночастотними приймачами, найкращу точність положення пунктів отримали для кутів відсічки 20° та 30°, а тривалістю 1 год – для кута відсічки 20°. Виконуючи спостереження тривалістю від 0,25 до 0,5 год, потрібно встановлювати таке значення кут відсічки, яке не перевищує 15°.

В табл. 3.6 виписані такі ж дані, як в табл. 3.5, але визначені за результатами спостережень супутників двох систем GPS і ГЛОНАСС. Тут характер впливу зміни кута відсічки є дещо іншим. Для кута відсічки 40° найнижчою є точність положення пунктів при сеансах тривалістю 1, 0,5 і 0,25 год.

Таблиця 3.6

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

№ мережі	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
<b>min</b>																
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
<b>max</b>																
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

Виконавши спостереження двосистемними двочастотними приймачами тривалістю 24 год, найвищу точність положення пунктів одержали встановивши кут відсічки рівним 15° (для третьої мережі – 5°). Найкраща точність визначення положення пунктів, за результатами спостережень тривалістю 12 год цими ж приймачами, одержана для кутів від 20° до 40°. Зменшення кута відсічки зумовлює поступове погіршення точності. При спостереженнях тривалістю 6, 3, 2 і 1 год найвищу точність пунктів одержали для кута відсічки 30°. Необхідно зауважити, що при тривалості спостережень 1 год для першої та другої мереж найкращі результати отримані не тільки при

куті відсічки  $30^\circ$ , але і  $0^\circ - 15^\circ$ . За результатами спостережень тривалістю 0,5 та 0,25 год найменше значення СКП отримано при куті відсічки  $15^\circ - 20^\circ$ .

Найгіршу точність визначення положення пунктів отримали, приймаючи сигнали супутників двох систем двочастотними приймачами тривалістю 24 год при кутах відсічки  $30^\circ$  і  $40^\circ$  для першої мережі. При тривалості 12 год найнижчою є точність для кута відсічки  $15^\circ$ , для першої мережі також для кута  $30^\circ$ . Якщо кут відсічки рівний  $40^\circ$ , то для першої мережі значення СКП сягають максимальних значень при тривалості сеансів спостережень від 0,25 до 3 год, для другої мережі при тривалості сеансів від 0,25 до 6 год, а третьої мережі – від 0,25 до 1 год.

Найвищої точності положення пунктів досягнуто виконуючи сеанси спостережень тривалістю 24 год двосистемними одночастотними приймачами при куті відсічки  $40^\circ$ , а тривалістю 12, 6, 3 і 2 год – при кутах відсічки не менших  $30^\circ$ . Для кутів відсічки  $20^\circ - 30^\circ$  найкращою є точність при тривалості сеансів від 1 до 0,5 год. За результатами спостережень 0,25 год найменші значення помилок отримані при кутах відсічки від  $0^\circ$  до  $10^\circ$  та  $20^\circ$  для третьої мережі. Максимальні значення СКП отримано для спостережень тривалістю 12 і 24 год при куті відсічки  $15^\circ - 20^\circ$ . Однак для третьої мережі при тривалості спостережень 12 год найбільші значення СКП одержані при висоті супутників над горизонтом  $0^\circ$  і  $10^\circ$ . Для сеансів тривалістю 3 год найбільші значення СКП отримані, якщо кут відсічки змінюється від  $0^\circ$  до  $10^\circ$ . За результатами спостережень тривалістю не більше як 1 год максимальні СКП пунктів, отримані, встановивши кут відсічки  $40^\circ$ . Зі зменшенням тривалості спостережень (1 год і менше) та збільшенням кута відсічки точність визначення положення пунктів погіршується, очевидно це пов'язано з тим, що при збільшенні кута відсічки та зменшенням тривалості сеансів спостережень зменшується кількість супутників, до яких приймач вимірює віддалі.

Оптимальні кути відсічки є різними для сеансів різної тривалості, тому можна рекомендувати при спостереженнях приймати сигнали супутників, які знаходяться не нижче  $5^\circ$  над горизонтом, а при опрацюванні результатів спостережень вибрати той кут відсічки при якому точність положення пунктів є

найвищою, тобто в діапазоні від  $15^\circ$  до  $30^\circ$ . Для тривалості сеансів 24, 12, 6, 3, 2, 1 год можна встановлювати більші значення кута відсічки з вказаного діапазону, а при тривалості спостережень 30 та 15 хв – менші.

Для визначення ефективності використання двох систем виконано порівняння СКП положення пунктів для кожної мережі, отриманих за однаковими варіантами сеансів спостережень тільки супутників системи GPS ( $M_{GPS}$ ) та супутників двох систем ( $M_{2системи}$ ). В табл. 3.7 для двочастотних приймачів наведені результати порівняння, а саме: кількість випадків у трьох мережах для кожної тривалості сеансу спостережень при всіх кутах відсічки, крім  $40^\circ$ , для яких використання супутників двох систем не дало позитивного результату, тобто для яких виконується нерівність  $M_{2системи} \geq M_{GPS}$  та кількість випадків, коли точність положення пунктів підвищилась при використанні супутників двох систем, тобто для яких виконується нерівність  $M_{2системи} < M_{GPS}$ . Необхідно зауважити, що при куті відсічки  $40^\circ$  не приймався до уваги, бо при цьому куті здебільшого різко збільшуються помилки положення пунктів. Кількість випадків відповідає кількості СКП, які отримані для кожної тривалості сеансу і чотирьох значень кута відсічки, тобто для тривалості сеансів 24, 12, 6, 3, 2, 1 год бралися до уваги СКП визначені при кутах відсічки від  $10^\circ$  до  $30^\circ$ , а при тривалості спостережень 30 та 15 хв – від  $5^\circ$  до  $20^\circ$ . Крім цього, враховувалася також кількість пунктів разом у трьох мережах.

Таблиця 3.7

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

Тривалість сеансу, год	Загальна кількість помилок	Кількість	%	Кількість	%
		$M_{2системи} \geq M_{GPS}$		$M_{2системи} < M_{GPS}$	
1	2	3	4	5	6
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

За результатами наведеними у табл. 3.7 побудована діаграма для сеансів різної тривалості, яка показані на рис. 3.12.

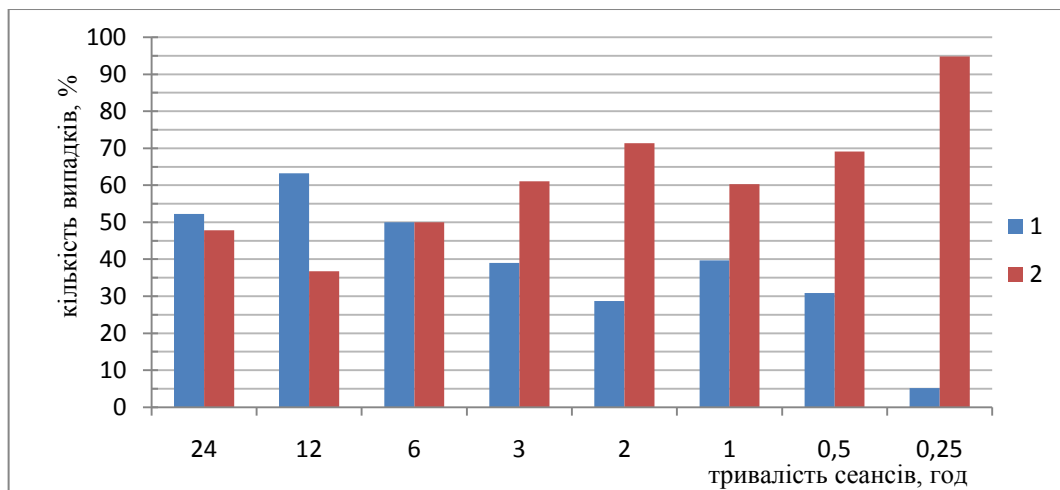


Рис. 3.12. Діаграми розподілу СКП положення пунктів, отриманих за спостереженнями системи GPS та GPS + ГЛОНАСС при різній тривалості сеансів спостережень двочастотними приймачами

На рис. 3.12 позначено 1 – кількість випадків, коли  $M_{2\text{системи}} \geq M_{\text{GPS}}$ , 2 –  $M_{2\text{системи}} < M_{\text{GPS}}$ .

Відповідно для одночастотних приймачів у табл. 3.8 наведені результати порівняння якості вимірів, одержаних при використанні супутників системи тільки GPS та супутників двох систем GPS і ГЛОНАСС.

Таблиця 3.8

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

Тривалість сеансу, год	Загальна кількість помилок	Кількість	%	Кількість	%
		$M_{2\text{системи}} \geq M_{\text{GPS}}$		$M_{2\text{системи}} < M_{\text{GPS}}$	
1	2	3	4	5	6
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. 3.8 побудована діаграма для сеансів різної тривалості, яка показана на рис. 3.13.

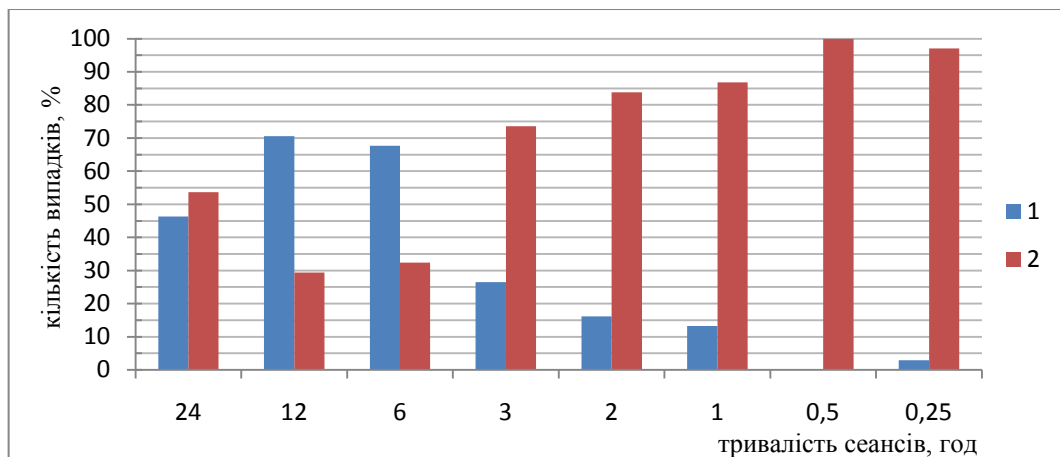


Рис. 3.13. Діаграми розподілу СКП положення пунктів, отриманих за спостереженнями системи GPS та GPS + ГЛОНАСС при різній тривалості сеансів спостережень одночастотними приймачами

На рис. 3.13 позначено 1 – кількість випадків, коли  $M_{2\text{системи}} \geq M_{\text{GPS}}$ , 2 –  $M_{2\text{системи}} < M_{\text{GPS}}$ .

Як бачимо на рис. 3.12 та 3.13 ефективність використання сигналів супутників системи ГЛОНАСС залежить від тривалості сеансів спостережень. Виконуючи спостереження тривалістю 24, 12 і 6 год підвищується точність приблизно у 37 - 50% випадків при використанні двох систем, а в 50 - 63% випадків точність положення пунктів підвищується використовуючи тільки систему GPS. При тривалості 3 год і менше підвищується точність при використанні двох систем у 60 - 95% випадків. Для одночастотних приймачів відповідно отримали: 29 - 54% випадків, коли при тривалості спостережень 24 - 6 год точність визначення положення пунктів підвищується, використовуючи дві системи та 74 - 100% при тривалості 3 - 0,25 год. Отже, додатній вплив приймання сигналів супутників системи ГЛОНАСС має місце тільки при сеансах спостережень тривалістю не більшою ніж 3 години.



### 3.3. Дослідження залежності точності визначення положення пунктів від типу ефемерид

Для того щоб визначення координат пункту було можливим необхідно, перш за все, знати положення супутників на орбіті, тобто їх ефемериди на момент вимірювання. Існує кілька типів ефемерид, які характеризуються різною точністю. Похибки положення супутника на орбіті, які надалі вважатимемо похибками орбіт, виникають внаслідок неточностей прогнозу і розрахунку ефемерид супутників на момент вимірювань. Отже, логічно припустити, що точність вимірів залежить від типу ефемерид, що використовується.

Бортові (Broadcast) або трансльовані ефемериди передаються безпосередньо від супутників і містять інформацію, що дозволяє приймачу визначати загальноземні геоцентричні координати кожного супутника у системі WGS-84. Точність цих ефемерид становить  $\sim 100$  см і  $\sim 5$  нс (покази годинника).

Остаточні (Final) ефемериди містять координати кожного супутника в системі ITRF, а також поправки годинника. Визначаються для кожного супутника з інтервалом 15 хвилин і стають доступними приблизно через два тижні після виконання спостережень, їх точність не перевищує 2,5 см і 0,75 нс.

Швидкі (Rapid) містять ту ж інформацію, що і точні, проте визначаються з використанням меншої кількості даних, їх точність становить  $\sim 2,5$  см і  $\sim 0,75$  нс. Ці ефемериди стають доступними через 17 годин від моменту проведення спостережень.

Ультрашвидкі або надшвидкі (Ultra-rapid) характеризуються точністю близько 3 - 5 см і 0,15 - 3 нс, їх можна отримати протягом поточного дня (на 03.00, 09.00, 15.00 і 21.00 UT) [149].

Останні три типи ефемерид отримують у центрі опрацювання IGS. Різниця між ними полягає у точності і часі очікування, як бачимо, найточнішими є остаточні ефемериди за ними йдуть швидкі та надшвидкі.

Необхідно також зауважити, що вище вказана точність ефемерид GPS-супутників, тоді як точність ефемерид ГЛОНАСС є приблизно у два рази гірша Крім того, вирішуючи певні завдання, що не вимагають високої точності, користувач отримає ідентичні результати, використовуючи точні та швидкі ефемериди [95].

Від точності ефемерид залежатиме точність визначення базової лінії, що в свою чергу впливатиме на точність визначення координат пункту. Відомо, що бортові ефемериди визначають лише наближене положення супутників, а також можуть містити похибки, які впливатимуть на якість виконаних вимірювань. Використання точних ефемерид дасть змогу покращити якість вимірів [122, 138]. Так згідно формули [2, 82, 154]:  $M_D = \frac{D \cdot M_E}{H}$ , де  $D$  – довжина базової лінії;  $M_E$  – похибка ефемерид супутника;  $H$  – висота орбіти супутника (близько 20000 км), встановлено, що при довжинах базових ліній 10 км, якщо використовувати бортові ефемериди, помилка лінії становитиме 0,5 мм. У випадку використання точних ефемерид точність визначення базових ліній значно зростає.

Однак, варто зауважити, що на коротких базових лініях (до 100 км) використання бортових ефемерид є більш ніж достатнім [2]. Сьогодні потреба у точних ефемеридах дещо зменшилася, причиною цього є значні досягнення у розвитку системи ГНСС. Так, наприклад, ще кілька років тому похибка бортових ефемерид становила 20 м і для того, щоб мінімізувати їх вплив рекомендувалося істотно зменшувати відстані між пунктами. Згідно дослідження [18] значення похибок ефемерид супутників у 2000 р. перевищують аналогічні показники 2010 р. практично на порядок.

Варто також зауважити, що опрацьовуючи вектори, довжини яких перевищують 50 км, досить складно отримати фіксований тип рішення при використанні бортових ефемерид. Тоді як при введенні точних ефемерид отримується фіксований результат [122].

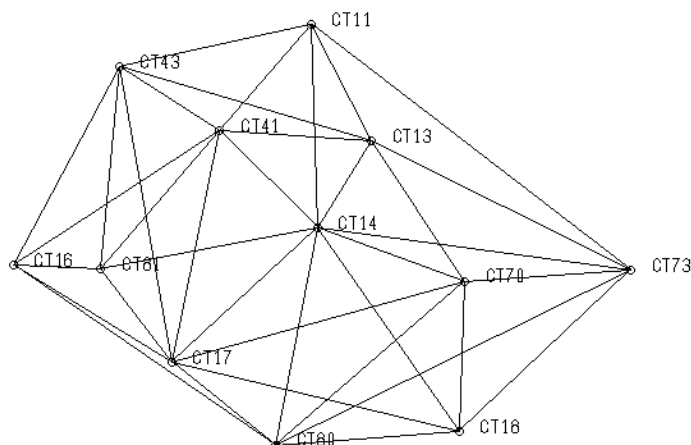
Найчастіше застосовують два типи ефемерид: бортові та остаточні, які характеризуються різною точністю.

В наших дослідженнях часто використовувалися мережі з довжинами векторів до 30 км, тому виникло питання у доцільності використання точних ефемерид для такого діапазону довжин, і чи достатньо обмежитися лише застосуванням бортових ефемерид.

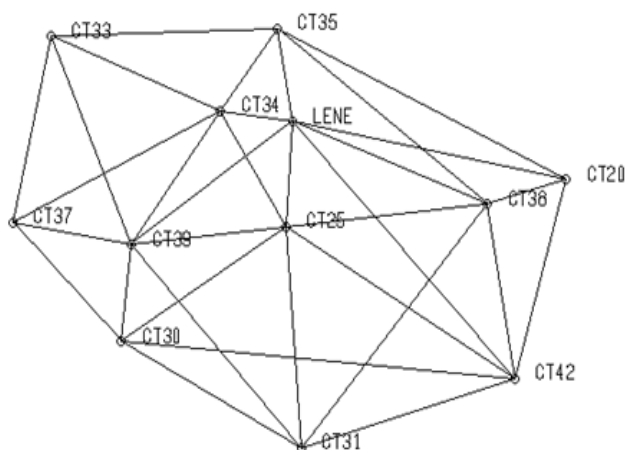
Для вирішення даної проблеми використані результати спостережень на перманентних станціях протягом двох діб, які взяті з [130] та [137], де також наводяться просторові координати цих станцій, за якими обчислені їх планові координати в проекції Гауса-Крюгера. Ці значення прийняті за істинні і з ними порівнювались координати пунктів супутникових мереж, які визначені зі спостережень різної тривалості. Сформовано три мережі з різними діапазонами довжин векторів. Перша мережа складається з 12 перманентних станцій та 37 векторів з довжинами від 16,6 до 75,9 км. Середнє значення довжини вектора в мережі становить 40,1 км. Друга – з 12 перманентних станцій та 33 векторів, довжини яких змінюються від 8,6 до 46,7 км. Середня довжина вектора – 22,7 км. І остання мережа складається з 13 станцій, які з'єднані між собою 34 векторами з довжинами від 3,9 до 18,0 км. Середня довжина вектора становить 10,8 км. Отже, як бачимо кількість станцій та векторів для цих трьох мереж є майже однаковим, тоді як діапазон довжин векторів в мережах поступово зменшується.

Перші дві мережі розташовані на території Франції, тоді як остання на території США (штат Каліфорнія). Необхідно також зауважити, що на пунктах перших двох мереж (мережа №1 та мережа №2) встановлені двосистемні приймачі, тобто можуть приймати сигнали таких систем, як GPS та ГЛОНАСС, тоді як на станціях мережі №3 працюють приймачі, що приймають сигнали виключно GPS-супутників. Схема кожної мережі представлена на рис. 3.14.

мережа №1



мережа №2



мережа №3

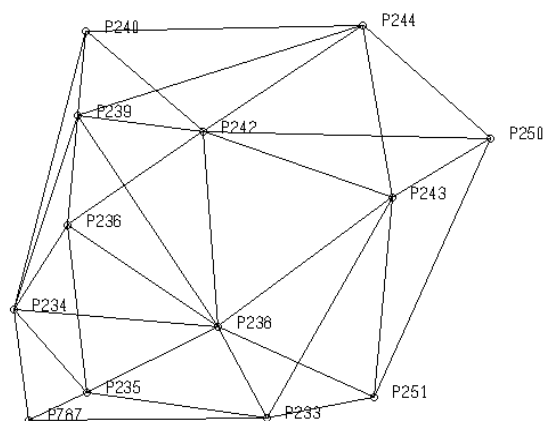


Рис. 3.14. Схеми мереж

Для опрацювання результатів спостережень використано програмне забезпечення Trimble Business Center. При цьому бралися до уваги супутники системи GPS, висота яких над горизонтом не менша  $10^\circ$ . Всі мережі опрацьовані за однаковою методикою при різній тривалості сеансів, а саме 24, 12, 6, 3, 2, 1 та 0,5 год, спочатку з використанням бортових ефемерид, а пізніше – остаточних. Для кожної мережі отримано по одному сеансу тривалістю 24 та 12 год, два сеанси тривалістю 6 год та по чотири сеансів тривалістю 3, 2, 1 та 0,5 год при використанні бортових та відповідно остаточних ефемерид. Дана кількість вказана для однієї доби, а таких є дві.

Бортові ефемериди, як вже вказувалося передаються безпосередньо від супутників під час виконання спостережень, і результатом при цьому є навігаційний файл (файл \*.n у форматі RINEX). Ці файли взяті з відповідних WEB-сторінок. Що стосується точних ефемерид, то існує багато джерел, де безкоштовно їх можна одержати, зокрема, Міжнародна Геодинамічна служба (IGS).

Після опрацювання результатів спостережень отримані просторові координати пунктів та обчислені їх планові координати в проекції Гауса-Крюгера, які у свою чергу порівнювалися з відповідними істинними значеннями. За обчисленими різницями визначені СКП положення пунктів трьох мереж при всіх тривалостях спостережень односистемними двочастотними приймачами, які наведені у табл. Б.4 (додаток Б).

Після цього, порівняли середні значення СКП положення кожного пункту, які отримані при кожній тривалості спостережень та використанні обох типів ефемерид. Отже, для першої мережі, опрацьованій із використанням остаточних ефемерид при всіх тривалостях спостережень у 98% випадків СКП є меншими ніж в цій же мережі, опрацьованій з бортовими ефемеридами. І тільки в двох випадках є навпаки. Встановлено, що для мережі №1, в якій довжини векторів сягають 76 км, значення середніх квадратичних помилок, які визначені при використанні бортових ефемерид, є в середньому на 5 мм більші, ніж при застосуванні остаточних ефемерид. Різниці між відповідними СКП, які отримані для кожного пункту мережі використовуючи різні типи ефемерид, змінюються від 1 до 14 мм. Аналогічним чином проаналізовані результати, отримані для двох інших мереж. Отже, у мережі №2 СКП положення пунктів є в середньому на 3 мм менші, ніж при використанні бортових ефемерид. Різниці між значеннями СКП змінюються від 0,2 до 9 мм. Проте у дев'яти випадках (11%) середні квадратичні помилки пунктів мережі, які визначені застосовуючи точні ефемериди, є більшими від відповідних їм значень, отриманих при використанні бортових ефемерид. Для мережі №3, в якій довжини векторів не перевищують 19 км, таких випадків (коли точність

визначення координат пунктів є нижчою при використанні остаточних ефемерид) є 33, що становить 36%. Різниця у точності визначення координат пунктів при використанні вказаних вище типів ефемерид є несуттєвою, тобто значення середніх квадратичних помилок положення пунктів, визначених при застосуванні остаточних ефемерид є в середньому на 0,3 мм меншими від СКП пунктів отриманими для бортових ефемерид, різниці змінюються від 0 до 2,3 мм. Крім того, у 33% випадків ця різниця рівна нулю, тобто точність є однаковою і не залежить від типу використаних ефемерид.

Отримані результати підтверджують також залежність точності визначення положення пунктів від тривалості спостережень, а також від віддалей між одночасно працюючими приймачами, незалежно від типу ефемерид.

Для унаочнення результатів в табл. 3.9 наведені найбільше, найменше та середнє значення СКП для сеансу певної тривалості.

Таблиця 3.9

СКП положення пунктів в мм, отриманих  
з використанням остаточних та бортових ефемерид

№ мережі	Діапазон довжин векторів (від - до), км		Тривалість спостережень, год													
			24	12	6	3	2	1	0,5	24	12	6	3	2	1	0,5
			Тип ефемерид													
			Остаточні							Бортові						
1	16,6–75,9	max	2,0	8,1	12,2	11,2	10,1	10,8	13,2	10,2	15,0	15,2	16,5	15,9	16,1	13,7
		min	1,0	1,4	2,1	1,8	1,9	2,8	2,9	4,1	4,0	2,7	2,5	2,6	3,5	4,3
		сер	1,4	4,9	6,6	6,4	6,2	6,2	8,3	7,5	10,9	10,8	11,3	11,3	10,5	11,5
2	8,6–46,7	max	1,4	5,0	5,8	6,7	7,1	6,5	9,0	7,1	10,2	11,1	10,8	10,8	10,9	9,8
		min	0,0	1,0	0,5	0,5	0,6	0,9	1,1	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	1,4	1,1
		сер	0,8	2,7	3,4	3,8	3,8	4,2	5,9	4,4	5,8	6,2	6,3	6,5	6,0	6,7
3	3,9–18,0	max	1,0	5,1	5,3	5,3	6,2	5,6	5,6	5,1	5,1	5,3	5,7	6,2	5,9	5,8
		min	0,0	1,0	1,7	2,2	2,3	3,3	3,2	1,0	1,4	2,2	2,2	2,3	3,6	3,2
		сер	1,5	3,2	3,8	3,9	4,0	4,7	4,8	2,0	3,2	3,7	3,9	4,0	4,5	4,7

Як бачимо з табл. 3.9, в першій мережі при всіх тривалостях спостережень діапазони значень СКП положення пунктів, отриманих при опрацюванні результатів спостережень з точними ефемеридами, є суттєво меншим від

діапазонів СКП, отриманих з бортовими ефемеридами. При цьому суттєво збільшилися як нижня, так і верхня межі діапазонів СКП. Це свідчить про підвищення точності положення пунктів при застосуванні остаточних ефемерид.

В другій мережі при всіх тривалостях спостережень також зменшився діапазон СКП при застосуванні остаточних ефемерид, але при цьому нижня межа діапазону СКП при обох типах ефемерид є одного порядку, близькою до 1 мм. З цього можна зробити висновок, що частина пунктів при використанні обох ефемерид має однакову точність.

В третій мережі діапазони СКП в обох випадках є дуже близькими, тобто точність положення пунктів практично не залежить від типу ефемерид.

За середніми значеннями СКП для графічного відображення залежності точності визначення положення пунктів від типу ефемерид побудовані для трьох мереж графіки, які показані на рис. Б.1 (додаток Б).

Проведене дослідження показує, що вплив остаточних ефемерид на точність положення пунктів супутникових мереж залежить від довжин векторів, з яких побудована мережа, оскільки найбільше підвищення точності отримано в мережі з найдовшими векторами. А в мережі з векторами довжиною до 20 км точні ефемериди практично не підвищують точності положення пунктів. В другій мережі, де тільки 13 векторів з 33 мають довжину до 20 км та 7 довжиною від 30 до 46,7 км, вже проявляється дія остаточних ефемерид, вони зменшили помилки положення пунктів в цій мережі в середньому на 3 мм.

Отже, незважаючи на підвищення точності бортових ефемерид в наш час, все таки використання остаточних ефемерид підвищує точність визначення положення пунктів в супутникових мережах, в яких зустрічаються вектори, довші від 30 км. А при створенні мереж, в яких є вектори довші 40 км, на наш погляд, використання остаточних ефемерид є обов'язковим.

Як вже вказувалося вище, крім остаточних ефемерид та бортових, точність яких є відповідно найвищою та найнижчою існують ще кілька типів ефемерид,

які також характеризуються певною точністю. Нами розглядалося питання впливу на точність визначення положення пунктів тільки бортових та остаточних ефемерид, а також як буде змінюватися ця залежність зі зміною довжин векторів. Однак, використання кожного з цих двох типів ефемерид, які нами розглядалися має як певні переваги, так і недоліки. Це зумовлено, насамперед, точністю та часом їх очікування. Остаточні ефемериди, точність яких є найвищою, стають доступними лише через 12 - 18 днів після виконання спостережень, тоді як бортові ефемериди, які є доступні кожного дня, характеризуються невисокою точністю, порівняно з іншими відомими типами ефемерид. Тому виникло питання, як буде залежати точність визначення координат пунктів від інших типів ефемерид, таких як: швидкі та ультра-швидкі. Точність цих ефемерид є вищою від бортових, крім того час очікування є набагато менший ніж остаточних. Швидкі стають доступними через 17 - 41 год, а ультра-швидкі – 3 - 9 год [2]. Оскільки дослідження впливу типу ефемерид на точність визначення положення пунктів виконувалося використовуючи тільки систему GPS, виникло питання, якою буде ця точність, якщо спостерігати одночасно супутники GPS та ГЛОНАСС та використовувати ефемериди супутників ГЛОНАСС. Крім того, як вже було з'ясовано, вплив бортових та остаточних ефемерид на точність визначення положення пунктів в мережі залежить від віддалей між пунктами. У мережах з короткими довжинами векторів вплив на точність вимірів типу ефемерид (остаточні, бортові) є мінімальним, тому у наступному дослідженні розглядалися мережі, віддалі між пунктами яких є більшими.

Оскільки сьогодні є досить актуальним питання спільного використання супутників GPS та ГЛОНАСС, тому міжнародною службою ГНСС (IGS) пропонуються ультра-швидкі ефемериди (розширення файлу – *igv*), які можна використовувати опрацьовуючи результати вимірювань двосистемними приймачами.

Для дослідження використані результати спостережень на перманентних станціях, які розташовані на територіях Бельгії і Швейцарії. Станції обладнані



двосистемними приймачами. На бельгійських станціях встановлено обладнання, виготовлене фірмою Leica (тип приймачів – leica GRX1200+GNSS, а модель антени – LEIAR25.R3 LEIT), тоді як швейцарські обладнані приймачами Trimble NetR5, а також антенами GNSS Choke та Zephyr Geodetic 2.

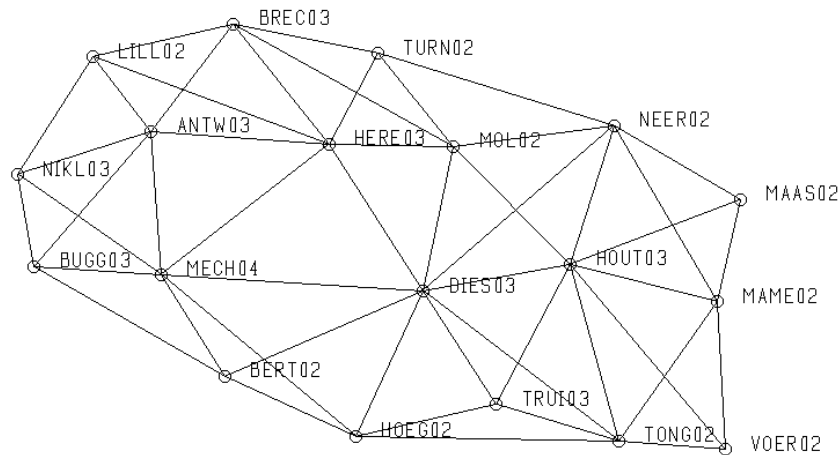
Для з'ясування впливу типу ефемерид на точність визначення положення пунктів використані результати спостережень на перманентних станціях протягом трьох діб, які взяті з WEB-сторінок [www.ntrip.flepos.be](http://www.ntrip.flepos.be) та [148].

Як відомо для досліджень найчастіше використовуються дані, дискретність сигналу яких становить 30 секунд. Однак, для бельгійських станцій були доступні результати спостережень, інтервал реєстрації даних яких рівний одній секунді, тому за допомогою програми `teqc` даний параметр був змінений для результатів спостережень з перманентних станцій бельгійської мережі за три доби.

Дослідження виконане за аналогічною методикою, що і попереднє. Отже, спочатку, за просторовими координатами цих станцій, обчислені їх планові координати в проекції Гауса-Крюгера, які прийняті за істинні і з ними порівнювались визначені зі спостережень різної тривалості координати пунктів супутникових мереж. Сформовано дві мережі з різними діапазонами довжин векторів, схеми яких представлені на рис. 3.15.

Дамо коротку характеристику кожній з мереж. Отже мережа №1 складається з 19 пунктів, які розташовані один відносно одного на відстанях від 14,5 до 40,7 км. Загальна кількість векторів в мережі рівна 50, а середнє значення довжин векторів в мережі становить 26,2 км. Мережа №2, яка розташована на території Швейцарії складається з 23 перманентних станцій та 57 векторів, довжини яких змінюються від 20,2 до 76,6 км. Середнє значення довжин векторів становить 47,0 км. Отже підібрані мережі з діапазоном довжин векторів, який поступово збільшується.

мережа №1



мережа №2

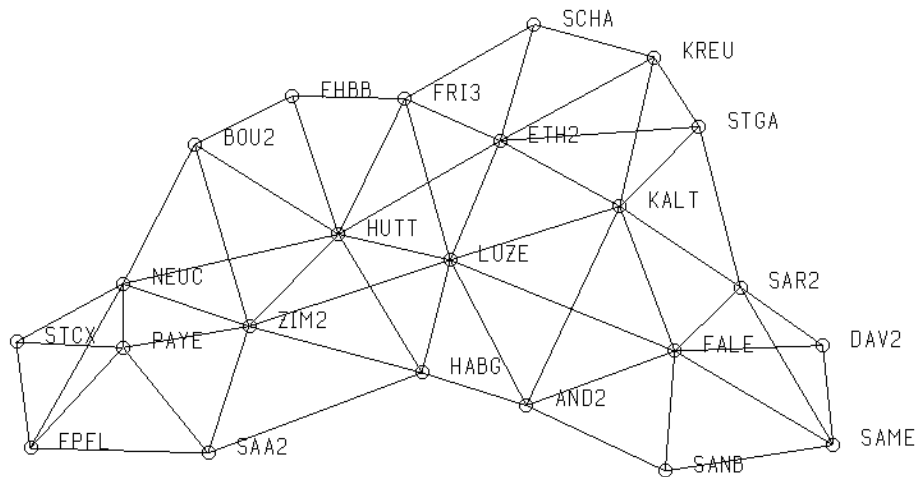


Рис. 3.15. Схеми мереж

Всі мережі опрацьовані за однаковою методикою при різній тривалості сеансів спостережень двочастотними приймачами, а саме 24, 12, 6, 3, 2, 1 та 0,5 та 0,25 години, з використанням певного типу ефемерид, спочатку використовуючи сигнали супутників тільки GPS, а пізніше – двох систем одночасно GPS та ГЛОНАСС. При цьому бралися до уваги супутники, висота яких над горизонтом не менша  $15^\circ$ . Необхідно також зауважити, що бортові ефемериди, взяті зі згаданих вже WEB-сторінок. Що ж стосується точних ефемерид, до яких відносять остаточні, швидкі та ультра-швидкі, то для системи GPS їх одержано з [149], а для системи ГЛОНАСС – Інформаційно-Аналітичного Центру (ІАЦ) координатно-часового і навігаційного забезпечення <http://glonass-iac.ru> (крім остаточних, які взяті з сайту IGS).

Для кожної мережі отримано по три сеанси тривалістю 24 та 12 год, шість сеансів тривалістю 6 год та по 12 сеансів тривалістю 3, 2, 1, 0,5 та 0,25 год при використанні кожного з типів ефемерид. Крім того, результати спостережень опрацьовувалися використовуючи різні типи ефемерид, тобто на кожному етапі цього дослідження, наприклад, для даних GPS+ГЛОНАСС завантажувалися файли з іншим типом ефемерид – остаточні GPS та ГЛОНАСС, бортові GPS та ГЛОНАСС, бортові ГЛОНАСС та швидкі GPS, бортові ГЛОНАСС і ультра-швидкі GPS і т.д. Таким чином для кожної мережі розглянуто п'ять варіантів опрацювання результатів, отриманих з використанням лише сигналів супутників GPS, основна відмінність яких це тип ефемерид, що імпортувався. Опрацьовуючи результати, отримані використовуючи дві системи (GPS та ГЛОНАСС), таких варіантів для кожної мережі розглянуто вісім.

Програмне забезпечення дає змогу також для кожного вектора в мережі, отриманого в кожному сеансі спостережень певної тривалості, переглянути інформацію про кількість супутників. Отже, було встановлено, що у випадку використання двох систем мінімальна кількість супутників становить десять (мережа № 1) та шістнадцять (мережа №2) при тривалості спостережень 24 год. При тривалості сеансів 0,25 год мінімальна кількість супутників, яка спостерігається на деяких пунктах першої мережі рівна шести, тоді, як для другої – одинадцять. Використовуючи сигнали супутників тільки системи GPS мінімальна їх кількість при тривалості сеансів 24 год, яка була зафіксована, становила дев'ять для мережі №1 та десять для мережі №2, а при тривалості 0,25 год – шість та п'ять.

Опрацювавши результати спостережень визначені СКП координат пунктів двох мереж при всіх тривалостях спостережень, які наведені у табл. 3.10 (односистемні приймачі) та 3.11 (двосистемні приймачі). В цих таблицях позначені: бортові GPS – n; бортові ГЛОНАСС – g; остаточні ефемериди GPS – igs; остаточні ефемериди ГЛОНАСС – igl; швидкі GPS – igr; швидкі ГЛОНАСС – r(glo); ультра-швидкі GPS – igu; ультра-швидкі ГЛОНАСС – u(glo); ультра-швидкі GPS+ГЛОНАСС – igv.

Таблиця 3.10

СКП (середні, максимальні та мінімальні значення) положення пунктів в мм,  
визначені при різній тривалості сеансів спостережень односистемними  
приймачами

Тривалість сеансу, год		Тип ефемерид				
		n	igs	igr	igu	igv
<i>I</i>	2	3	4	5	6	7
мережа №1						
24	сер.	6,7	6,1	6,1	6,5	6,3
	max	15,1	13,6	13,6	15,0	14,3
	min	1,0	0,0	0,0	0,7	0,0
12	сер.	7,7	6,9	6,9	7,0	6,5
	max	15,3	14,5	14,6	15,0	14,9
	min	1,0	0,0	0,7	0,7	0,0
6	сер.	6,9	6,6	6,8	6,8	6,9
	max	14,6	14,0	14,5	14,5	14,6
	min	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9
3	сер.	6,7	6,3	6,3	6,4	6,4
	max	13,9	13,5	13,5	13,6	13,6
	min	0,8	0,9	0,9	0,9	0,7
2	сер.	7,1	6,8	7,0	7,0	7,0
	max	13,7	13,5	13,6	13,6	13,6
	min	0,9	0,7	0,9	0,9	0,9
1	сер.	7,5	6,6	6,6	6,8	6,8
	max	14,6	12,8	12,8	13,2	13,2
	min	1,1	0,9	1,0	1,0	1,0
0,5	сер.	8,7	7,7	7,7	7,8	7,7
	max	16,3	13,7	13,7	14,0	13,8
	min	1,9	1,7	1,7	1,7	1,7
0,25	сер.	13,8	12,0	12,9	13,0	13,0
	max	20,6	17,9	18,2	18,7	17,8
	min	9,2	7,2	6,9	8,0	7,0
мережа №2						
24	сер.	6,6	6,2	6,3	6,3	6,4
	max	16,6	15,3	15,7	15,7	16,6
	min	2,6	2,0	2,7	2,7	2,6
12	сер.	8,6	7,7	7,7	7,8	7,7
	max	17,6	16,1	16,8	16,6	16,6
	min	3,8	2,6	2,6	2,6	2,6
6	сер.	9,6	8,2	8,3	8,4	8,4
	max	16,6	15,0	15,3	15,6	15,5
	min	4,3	3,0	3,2	3,4	3,5
3	сер.	11,7	10,3	10,3	10,5	10,4
	max	17,3	16,4	16,1	16,3	16,0
	min	6,7	5,3	5,7	5,6	5,5
2	сер.	11,8	11,3	11,0	11,7	11,6
	max	48,8	36,3	39,2	48,2	48,1
	min	7,3	6,3	5,6	5,5	5,7

Продовження таблиці 3.10

1	2	3	4	5	6	7
1	сер.	15,1	13,1	13,5	13,8	13,4
	max	34,8	21,6	21,9	34,0	31,9
	min	10,3	9,0	9,2	8,9	8,8
0,5	сер.	34,9	24,4	26,0	27,9	28,4
	max	41,6	35,7	34,6	36,0	35,6
	min	19,0	15,6	15,8	18,1	18,8
0,25	сер.	39,2	24,4	25,7	34,1	38,9
	max	57,9	51,2	42,9	57,3	57,1
	min	29,3	12,1	13,5	24,4	28,3

Таблиця 3.11

СКП (середні, максимальні та мінімальні значення) положення пунктів в мм,  
визначені при різній тривалості сеансів спостережень двосистемними  
приймачами

Тривалість сеансу, год		Тип ефемерид							
		n+g	igs+igl	igr+r(glo)	igu+u(glo)	igv	g+igs	g+igr	g+igu
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
мережа №1									
24	сер.	6,4	5,9	6,2	6,8	6,3	5,6	5,6	6,3
	max	15,0	14,4	15,0	13,6	14,3	13,3	13,3	13,9
	min	1,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	1,2
12	сер.	7,1	6,7	6,5	6,7	6,2	6,0	6,2	6,2
	max	16,3	14,6	14,9	15,3	13,8	13,1	13,8	13,8
	min	1,0	0,7	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,0
6	сер.	7,0	6,8	6,6	6,8	6,4	6,5	6,4	6,6
	max	14,6	14,3	14,7	14,5	12,8	13,2	13,0	13,5
	min	0,7	0,9	1,0	0,7	0,9	0,7	1,0	0,9
3	сер.	6,6	6,3	6,3	6,5	6,4	6,1	6,2	6,6
	max	13,4	13,5	13,7	13,7	13,6	13,1	13,2	13,4
	min	1,4	0,8	0,7	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1
2	сер.	7,0	6,9	7,5	7,0	7,0	6,7	6,8	6,3
	max	13,9	12,9	14,6	13,9	13,6	12,7	12,9	12,3
	min	1,4	0,9	0,9	0,9	0,9	1,1	1,1	1,0
1	сер.	7,1	6,6	6,6	6,7	6,8	6,4	6,5	6,6
	max	13,6	12,9	13,2	13,2	13,2	12,4	12,4	13,0
	min	0,9	1,1	0,7	1,0	0,9	1,1	1,1	0,9
0,5	сер.	8,1	7,7	8,1	7,5	7,7	7,3	7,3	8,1
	max	14,6	13,9	13,7	15,5	13,7	13,3	13,3	14,5
	min	1,4	1,9	1,0	1,9	1,6	1,4	1,4	1,4
0,25	сер.	12,9	11,8	12,0	12,5	12,0	11,4	11,6	12,5
	max	21,0	17,7	18,2	18,2	17,8	16,3	16,3	16,9
	min	7,9	7,0	5,7	7,2	7,0	7,3	7,5	8,4

Продовження таблиці 3.11

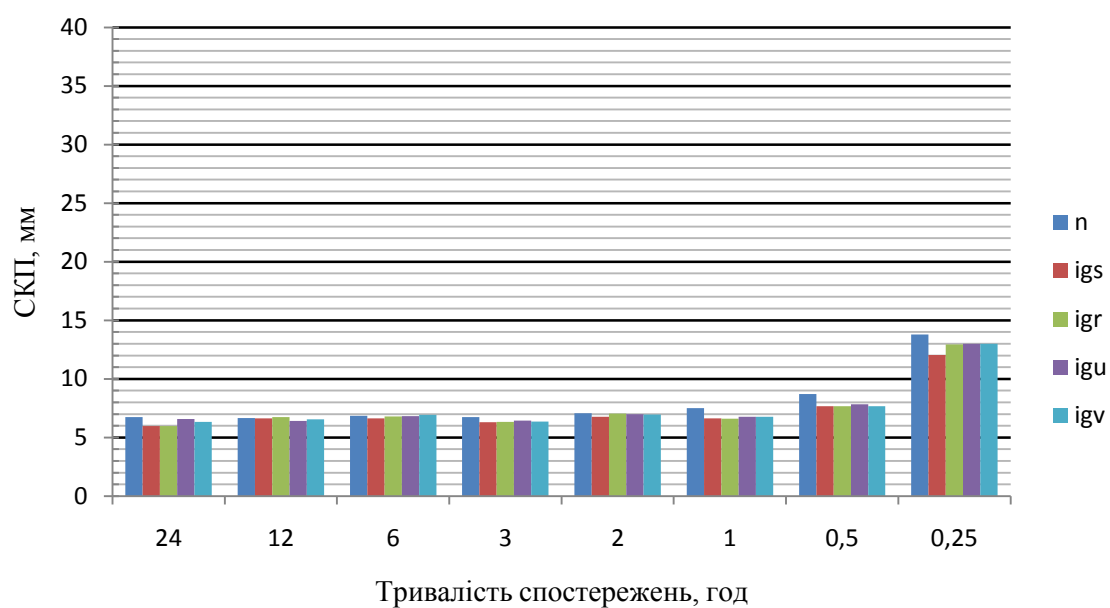
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
мережа №2									
24	сер.	6,9	6,3	6,3	6,2	6,3	6,6	6,6	6,4
	max	16,9	15,7	15,7	15,5	16,1	17,0	17,0	17,0
	min	2,4	2,7	2,7	2,0	2,6	2,8	2,8	1,9
12	сер.	8,5	7,9	7,8	7,8	7,7	7,8	7,9	7,9
	max	18,0	17,0	16,8	15,4	16,6	17,5	18,3	18,4
	min	3,8	2,6	2,6	2,2	2,6	3,1	2,8	2,8
6	сер.	9,5	8,4	8,4	8,6	8,4	8,6	8,5	8,7
	max	16,6	15,7	15,3	14,9	15,4	16,4	16,4	16,2
	min	3,8	3,2	3,2	3,5	3,2	3,8	3,6	3,6
3	сер.	10,5	10,3	10,4	10,5	10,5	9,8	9,8	9,9
	max	18,5	16,3	16,3	16,1	16,4	17,7	17,9	17,9
	min	5,2	5,4	5,8	5,3	5,6	5,6	5,6	6,0
2	сер.	12,4	11,1	11,1	11,7	10,5	9,6	9,9	9,9
	max	44,8	39,1	39,1	44,7	18,1	17,3	17,9	17,9
	min	6,8	5,7	5,8	6,5	6,0	4,8	5,2	5,2
1	сер.	14,0	13,5	13,1	13,2	13,6	12,1	12,2	12,4
	max	32,1	23,2	21,7	17,7	31,9	16,6	16,6	17,7
	min	9,5	9,1	8,9	7,8	8,9	8,0	8,3	7,2
0,5	сер.	35,8	26,2	26,5	28,4	16,2	16,2	16,4	18,8
	max	44,3	33,6	34,5	36,1	21,7	22,1	22,2	26,0
	min	19,6	16,2	16,3	18,3	3,9	4,8	4,9	8,9
0,25	сер.	38,8	38,7	27,3	24,8	16,4	16,1	16,2	16,4
	max	57,1	57,3	34,1	51,0	21,6	23,2	24,2	24,6
	min	28,9	28,9	20,6	12,0	6,9	11,3	11,8	12,6

Проаналізувавши отримані максимальні значення СКП положення пунктів двох мереж, тобто випадки, коли отримані найгірші результати, встановили, що найбільші значення СКП отримали використовуючи бортові ефемериди.

Розглянувши результати, отримані для односистемних приймачів та з використанням точних ефемерид, з'ясували, що найчастіше найбільші значення СКП пунктів у двох мережах отримували у випадку застосування ультрашвидких ефемерид. Для двосистемних приймачів простежити якусь закономірність є складніше.

За середніми значеннями СКП положення пунктів, які визначені використовуючи тільки сигнали супутників GPS та разом двох систем GPS + ГЛОНАСС, для кожної мережі побудовані графіки, які представлені на рис. 3.16 та рис. 3.17.

## мережа №1



## мережа №2

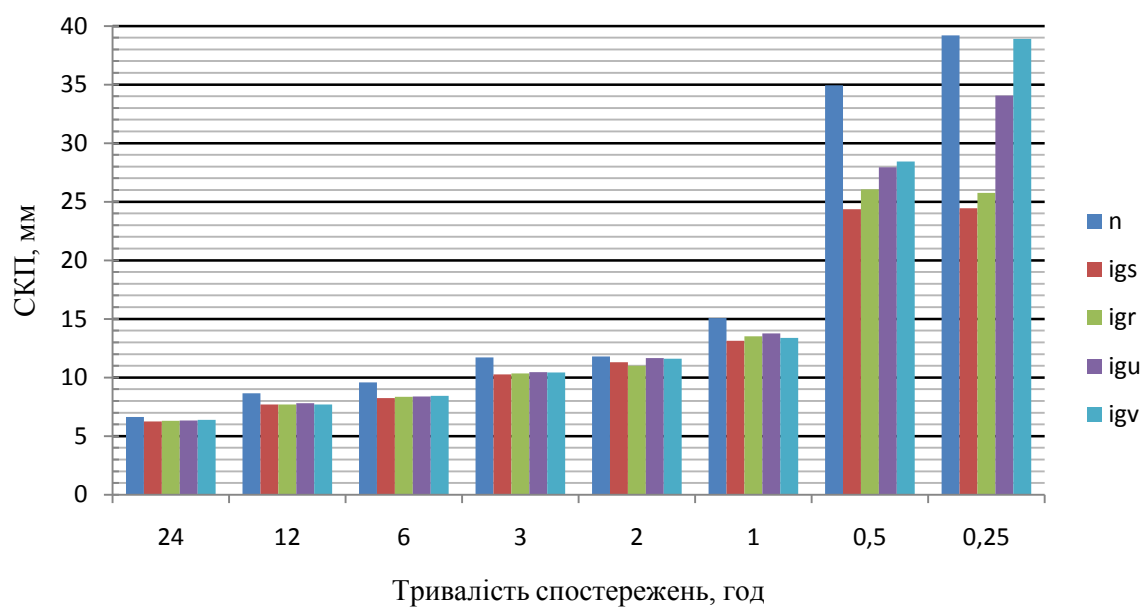


Рис. 3.16. Графіки залежності точності визначення положення пунктів від різного типу ефемерид та зміни тривалості спостережень односистемними приймачами

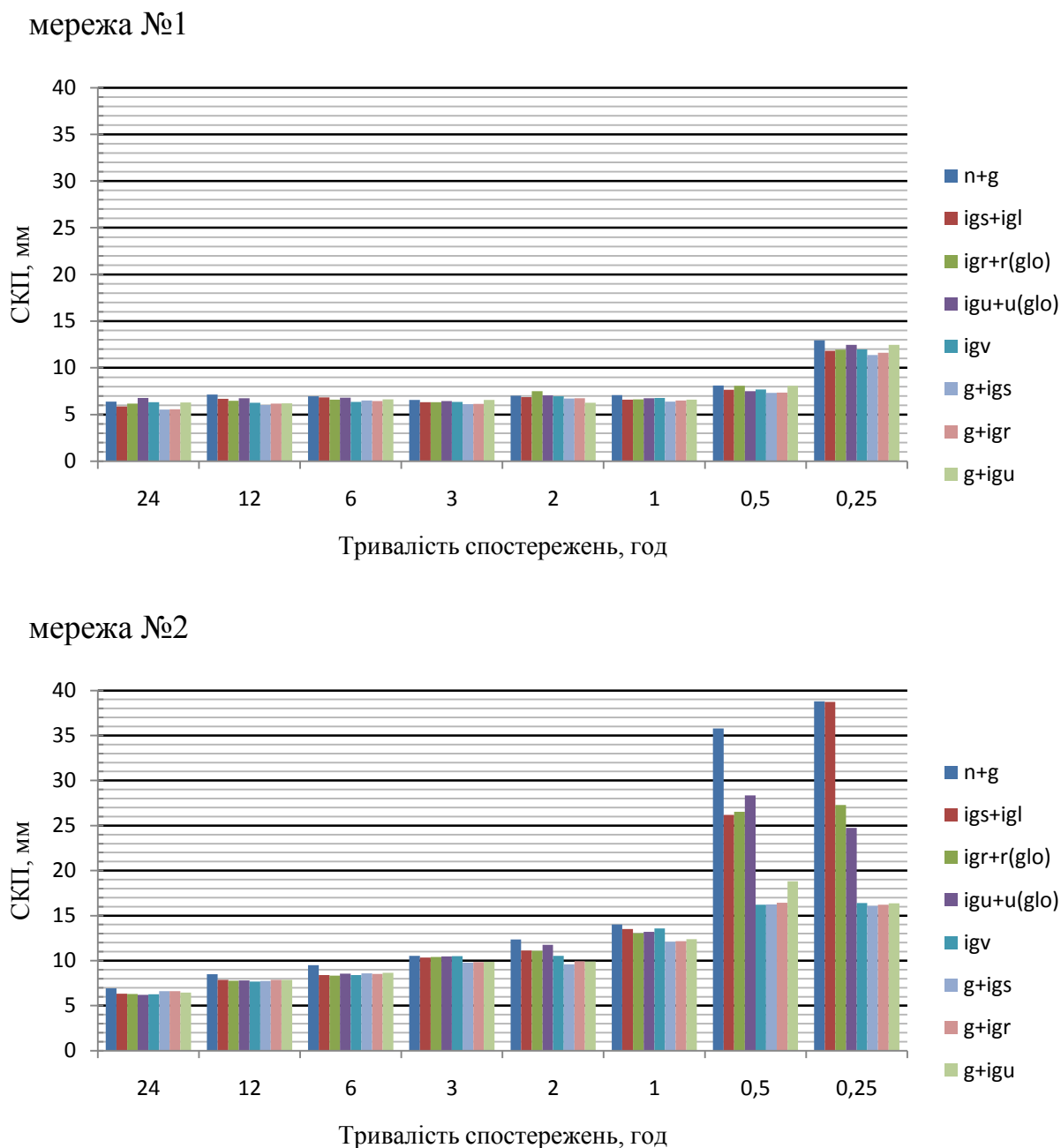


Рис. 3.17. Графіки залежності точності визначення положення пунктів від різного типу ефемерид та зміни тривалості спостережень двосистемними приймачами

Порівнюючи середні значення СКП положення пунктів обох мереж, отриманих при використанні бортових та остаточних ефемерид, бачимо, що при тривалості сеансів спостережень 24, 12 і 6 год односистемними приймачами остаточні ефемериди підвищують точність положення пунктів в середньому на 10%. Зменшення тривалості сеансів спостережень підсилює вплив остаточних



ефемерид на точність визначення положення пунктів. Так при тривалості сеансів 0,5 год остаточні ефемериди підвищують точність положення пунктів в середньому на 27%, а 0,25 год – 31%. Тільки при тривалості сеансів 2 год остаточні ефемериди підвищили точність пунктів на 4,2%.

Вплив інших типів ефемерид також залежить від тривалості сеансів. При тривалості сеансів 24 і 12 год та використанні швидких ефемерид, ми отримали таку ж точність положення пунктів, як і для остаточних. При меншій тривалості сеансів точність положення пунктів знижується використовуючи: при тривалості 6 год – на 2,7%, 3 год – на 5,1%, 1 год – на 2%, 0,5 год – на 5,6% і 0,25 год – 6%. Ефективність використання ультра-швидких ефемерид є меншою ніж швидких, особливо при коротких сеансах спостережень 1 - 0,25 год. Вплив ультра-швидких ефемерид призначених для двох систем є близьким до впливу ультра швидких системи GPS.

Порівнявши результати, наведені у табл. 3.10 і 3.11, бачимо, що незалежно від типу ефемерид точність положення пунктів, визначених при тривалості сеансів спостережень від 6 до 24 год двосистемними приймачами є або такою ж, як і при спостереженнях односистемними приймачами, або меншою. При коротших сеансах спостережень точність визначення положення пунктів є однаковою для обох типів приймачів, або ж є вищою для двосистемних приймачів.

Проаналізувавши середні значення СКП, визначені для кожної тривалості сеансів, встановили, що результати отримані для двох систем, використовуючи як ефемериди системи GPS, так і ГЛОНАСС, не є однозначними. Однак для обох мереж в більшості випадків СКП є найменшими, якщо опрацювати результати спостережень з остаточними ефемеридами системи GPS та бортовими ГЛОНАСС. Хоча, варто зауважити, що для мережі №2 ця закономірність простежується при тривалості сеансів не більшій ніж 3 год (крім 0,5 год), тобто у 50% випадків. Отже, можна рекомендувати при опрацюванні результатів, отриманих використовуючи дві системи, застосовувати бортові ефемериди ГЛОНАСС та остаточні GPS. Як відомо, точні ефемериди є доступними для використання

через різні проміжки часу, тому замість остаточних ефемерид можна рекомендувати використовувати швидкі ефемериди GPS.

Крім того, отримані нами результати досліджень підтверджують висновки зроблені в [114], що використання точніших ефемерид дозволяє зменшити тривалість спостережень у мережах з довгими векторами.

Оскільки для дослідження використано "звичайне" програмне забезпечення, яке є доступним користувачеві для того, щоб отримати результати максимально наближені до реальних умов, невідомо яким саме чином програма "вибирає" параметри орбіт супутників, якщо імпортувати різні типи ефемерид одночасно.

## **ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ**

1. Проаналізовано ефективність спільного використання сигналів супутників двох систем GPS та ГЛОНАСС. З'ясовано, що при зменшенні тривалості спостережень (особливо до 0,5 - 0,25 год) точність визначення положення пунктів у мережах є вищою у разі застосування двох систем. Одночасне використання супутників систем GPS та ГЛОНАСС є малоефективним, якщо тривалість сеансів є більшою ніж три години.

2. Проведене дослідження впливу зміни кута відсічки на точність положення пунктів мереж при різній тривалості сеансів спостережень дво- та одночастотними приймачами сигналів супутників двох систем GPS та ГЛОНАСС і тільки системи GPS. На підставі отриманих результатів можна рекомендувати приймати сигнали супутників, які знаходяться не нижче  $5^\circ$  над горизонтом, а при опрацюванні результатів спостережень вибрати той кут відсічки, при якому точність положення пунктів є найвищою, тобто найчастіше в діапазоні від  $15^\circ$  до  $30^\circ$ . Для тривалості сеансів 24, 12, 6, 3, 2, 1 год можна

встановлювати більші значення кута відсічки з вказаного діапазону, а при тривалості спостережень 30 та 15 хв – менші.

3. Виконані дослідження впливу типів ефемерид на точність положення пунктів мереж з різними діапазонами довжин векторів. Встановлено, що для опрацювання результатів спостережень у мережах, створених за допомогою двочастотних GPS-приймачів, віддалі між пунктами яких перевищують 40 км, використання остаточних ефемерид є обов'язковим.

Крім того, можна рекомендувати, при опрацюванні результатів, отриманих двосистемними приймачами, використовувати бортові ефемериди ГЛОНАСС та остаточні або швидкі GPS.

Отримані нами результати досліджень підтверджують, що використання точніших ефемерид дає змогу зменшити тривалість спостережень у мережах з довгими векторами.

## ВИСНОВКИ

У процесі розробки теоретичних положень і практичних рекомендацій щодо вирішення поставлених завдань актуалізації параметрів супутникових спостережень відносним статичним методом при створенні геодезичних мереж, отримані результати, які можна сформулювати наступним чином:

1. Виконано дослідження залежності точності визначення довжин векторів у мережі від зміни тривалості сеансів спостережень та віддалі між приймачами. За результатами якого, отримані формули для оцінки точності визначення довжин векторів, які рекомендується застосовувати при тривалості сеансів від 6 до 0,5 год та віддалях між двосистемними дво- та одночастотними приймачами від 1 до 30 км. Формули можна використовувати при проектуванні супутникових мереж для встановлення оптимальної тривалості спостережень.

2. За результатами дослідження залежності точності визначення положення пунктів від тривалості сеансів супутникових спостережень, кількості і довжин векторів, за параметрами яких визначається пункт, виведені формули СКП положення пунктів. Формула (2.15) рекомендується для апріорної оцінки точності пунктів мереж, створюваних відносними статичними спостереженнями супутників двох систем двочастотними приймачами при довжинах векторів від 15 до 50 км та тривалості спостережень від 6 до 0,25 год. Формулу (2.13) доцільніше використовувати при довжинах векторів до 70 км та тривалості сеансів спостережень від 6 до 1 год.

3. Проаналізовано ефективність спільного використання сигналів супутників систем GPS та ГЛОНАСС. Результати досліджень показали, що одночасне спостереження супутників цих систем підвищує точність визначення положення пунктів супутникових мереж, якщо тривалість сеансів є меншою ніж 3 год. Найбільш ефективним є застосування двосистемних приймачів при тривалості спостережень 0,5 - 0,25 год. Використання супутників систем GPS та ГЛОНАСС є малоефективним, якщо тривалість сеансів є більшою ніж 3 год, в такому випадку можна використовувати тільки одну систему GPS.

4. Проведено дослідження точності визначення положення пунктів супутникових мереж за спостереженнями різної тривалості (24, 12, 6, 3, 2, 1, 0,5, 0,25 год) дво- і одночастотними одно- та двосистемними приймачами при різних значеннях кута відсічки ( $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  і  $40^\circ$ ). Отримані результати дають можливість встановити оптимальні значення кутів відсічки, які є різними для сеансів різної тривалості. Тому можна рекомендувати при спостереженнях приймати сигнали супутників, які знаходяться не нижче  $5^\circ$  над горизонтом, а при опрацюванні результатів спостережень вибрати той кут відсічки, при якому точність визначення положення пунктів є найвищою, найчастіше в діапазоні від  $15^\circ$  до  $30^\circ$ .

5. Виконано дослідження впливу типів ефемерид на точність визначення положення пунктів мереж з різними діапазонами довжин векторів. Незважаючи на підвищення точності бортових ефемерид в наш час, все таки використання остаточних ефемерид підвищує точність визначення положення пунктів в супутникових мережах, створених за допомогою системи GPS, в яких зустрічаються вектори, довші ніж 30 км. А при створенні точних мереж, в яких є вектори довші 40 км, на наш погляд, використання остаточних ефемерид є обов'язковим.

При опрацюванні результатів, отриманих двосистемними приймачами рекомендується використовувати бортові ефемериди ГЛОНАСС та остаточні GPS. Як відомо, точні ефемериди є доступними для використання через різні проміжки часу, тому замість остаточних ефемерид можна застосовувати швидкі.

Отримані в дисертаційній роботі актуальні показники методики відносних статичних спостережень дають змогу використовувати сучасні можливості ГНСС, оптимізувати процес проектування та створення геодезичних мереж.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Александров И. Космическая радионавигационная система НАВСТАР/ И. Александров // Зарубежное военное обозрение. – М., 1995. – № 5. – С. 52-63.
2. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 1. Монография / К. М. Антонович; ГОУ ВПО "Сибирская государственная геодезическая академия". – М.: ФГУП "Картгеоцентр" 2005. – 334 с.
3. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 2. Монография / К. М. Антонович; ГОУ ВПО "Сибирская государственная геодезическая академия". – М.: ФГУП "Картгеоцентр" 2005. – 359 с.
4. Антонович К.М. Пути развития ГНСС технологий в геодезии / К.М. Антонович // Вестник СГГА (Сибирской Государственной Геодезической Академии). – Новосибирск, 2005. – Выпуск 11. – С. 56-63.
5. Баран П.І. Визначення тривалості GPS-спостережень в геодезичних мережах / П. І. Баран, В. Я. Чернокін // Вісник геодезії та картографії: наук. техн. журнал. – К., 2004. – №2. – С. 12-15.
6. Баран П.И. К расчету точности и построения GPS-сетей / Баран П.И., Черноконов В. Я. // Materialy konferencji "Metody geodezji, fotogrametriji i teledetecji dla inzynierji srodowiska i budownictwa" Warszawa: SGAN, 2000. – P. 18-20.
7. Генике А.А. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии / А.А. Генике, Побединский Г.Г. – [Изд. 2-е, перераб. и доп.]. – М.: Картгеоцентр, 2004. – 355 с.
8. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических и землеустроительных работ. Метрологическое обеспечение. Основные положения: ГОСТ Р 53606-2009. – [Дата введения – 2011 - 01 - 01]. – М.: Стандартиформ, 2010. – 12с. – (Национальный стандарт Российской Федерации).

9. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / [Болдин В. А., Зубинский В. И., Зурабов Ю. Г и др.]; под ред. В. Н. Харисова, А. И. Петрова, В. А. Болдина. – М.: ИПРЖР, 1998. – 400 с.
10. ГЛОНАСС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/ГЛОНАСС> (Материал из Википедии – свободной энциклопедии).
11. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / [Бакитько Р.В., Болденков Е.Н., Булавский Н.Т. и др.]; под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – [Изд. 4-е, перераб. и доп.]. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
12. Голубев А. Н. Глобальные спутниковые навигационно-геодезические системы. Основные принципы устройства и работы: учебное пособие/ Голубев А. Н. – М.: Изд-во МИИГАиК, 2003. – 67 с.
13. Государственная Геодезическая сеть Республики Беларусь. Основные положения. – М.: Госстандарт, 2005. – 11с. – (Государственный стандарт Республики Беларусь).
14. Гофманн-Веленгоф Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): теорія і практика / Б. Гофманн-Веленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз; пер. з англ. третього вид. вид. під ред. Я.С. Яцківа. – К.: Наукова думка, 1995. – 380 с.
15. Гофманн-Веленгоф Б. Навігація. Основи визначення місцеположення та скеровування. / Ліхтенеггер Г., Коллінз Д. // Львів: Львівський національний університет ім. І. Франка. – 2006. – 449 с.
16. Дементьев В.Е. Современная геодезическая техника и ее применение: [учеб. пособие для вузов. – изд. 2-е] / В.Е. Дементьев. – М.: Академический Проект, 2008. – 591 с.
17. Заблоцька О. Дослідження ефективності геометричної конфігурації космічних сегментів / О. Заблоцька, К. Третяк // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. пр. – 2000. – Вип. 60. – С. 67-70.
18. Задемленюк А.В. Дослідження впливу похибок на супутникові вимірювання в RTK-режимі / А.В. Задемленюк // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2010. – Вип. 73. – С. 25-33.

19. Евстафьев О. Наземная инфраструктура для точного позиционирования / О. Евстафьев // Геопрофи. – 2008. – № 1. – С. 21-24; № 2. – С. 24-28; № 3. – С. 15-18; № 5. – С. 43-48.
20. Евстафьев О. В. Наземная инфраструктура ГНСС для точного позиционирования / Евстафьев О. В. – М.: Проспект, 2009. – 48 с.
21. Инструкция по развитию съёмочного обоснования и съёмке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS (ГКИНП (ОНТА) - 02 - 262 - 02). – М.: ЦНИИГАиК, 2002. – 56 с.
22. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 (ГКНТА-2.04-02-98). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.geoguide.com.ua/basisdoc/basisdoc.php?part=tgo&art=3501>.
23. Інструкція про побудову державної геодезичної мережі з використанням спутникових радіонавігаційних систем. – Офіц. вид. – К.: Міністерство екології та природних ресурсів України, 2002. – 56 с.
24. Іщенко М. В. Зведена обробка спостережень регіональної GPS-мережі та її результати: дис. к.т.н. 01.03.01 / Іщенко Марина Вікторівна. – Київ, 2012. – 144 с.
25. Костецька Я. Аналіз методів урахування впливу іоносфери на результати GPS-спостережень / Я. Костецька, Л. Янків-Вітковська Н. Шандрович // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. пр. – Л., 2007. – Вип. II (14). – С. 35-44.
26. Костецька Я. Вплив кута відсічки та типу приймача на точність визначення положення пунктів / Я. Костецька, Ю. Пішко, І. Торопа // Геодезія, картографія і аерофотознімання: міжвідомчий наук.-техн. зб. – Л., 2014. – Вип. 80. – С. 20-29.
27. Костецька Я. Вплив типу ефемерид на точність визначення положення пунктів спутникових мереж / Я. Костецька, Ю. Пішко // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. пр. – Л., 2013. – Вип. 1. (25) – С. 67-69.



28. Костецька Я. До питання точності довжин векторів, отриманих за результатами відносних GPS-спостережень двочастотними приймачами/Я. Костецька, Ю. Пішко//Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. пр. – Л., 2009. – Вип. .1 (17) – С.92-97.
29. Костецька Я. До питання тривалості GPS-спостережень залежно від довжини вектора-базис / Я. Костецька, І. Торопа, О. Фок // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. пр. – Л., 2005. – Вип. II. – С. 60-65.
30. Костецька Я. Залежність точності визначення положення пунктів у супутникових мережах від тривалості сеансів спостережень / Я. Костецька, Ю. Пішко, Д. Гешель // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. пр. – Л., 2011. – Вип. .2 (22) – С.96-102.
31. Костецкая Я. Определение точного расположения пунктов спутниковой системы при длительном сеансе наблюдений с помощью систем GPS и ГЛОНАСС на различных углах отсечки / Я. Костецкая, Ю. Пишко // Известия Национального Университета Архитектуры и Строительства Армении – Єреван, 2014. – 1 (39) – С. 95-100.
32. 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.
33. Костецька Я. Порівняння точності довжин векторів, отриманих за результатами спостережень одно- і двочастотними приймачами при різній тривалості сеансів / Я. Костецька, Ю. Пішко// Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні: матеріали V міжнародної науково-практичної конференції. – Ужгород, 28-30 жовтня 2010. – С. 164-166.
34. Костецька Я. Точність визначення положення пунктів з використанням супутникових систем GPS та ГЛОНАСС / Я. Костецька, Ю. Пішко // Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні: матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції. – Ужгород, 2012. – С. 282-284.

35. Крупин А. Модернизация GNSS и современное геодезическое GNSS оборудование Trimble / А. Крупин, В. Глущенко // Геопрофиль. – 2010. – №2(11). – С. 33-34.
36. Крушельницька О.В. Методологія та організація наукових досліджень: Навч. посібник / О.В. Крушельницька. – К.: Кондор, 2003. – 192 с.
37. Насыров И. А. Введение в современные спутниковые радионавигационные системы. Часть 1: общие принципы, современное состояние: [Учебное пособие] / Игорь Альбертович Насыров. – Казанский государственный университет, 2005. – 43 с.
38. Никитин А. Совмещенные приемные модули систем ГЛОНАСС/GPS производства КБ "ГеоСтар Навигация" / А. Никитин // Новости электроники. – 2010. – № 4. – С. 7-12.
39. Основные положения о государственной геодезической сети Российской Федерации (ГКИНП (ГНТА) – 01 - 006 - 03). – М.: ЦНИИГАиК, 2004. – 14с.
40. Особенности одно- и двухчастотных геодезических приемников [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://eps.com.ua/articles>.
41. Пішко Ю. Уточнення формул середніх квадратичних помилок довжин векторів, визначених за результатами спостережень GPS-приймачами / Ю. Пішко// Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. пр. – Л., 2012. – Вип. .1 (23) – С. 87-90.
42. Романовский В. И. Применение математической статистики в опытном деле. – М.: ОГИЗ, 1957. – 248 с.
43. Российская система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) Высоточное местоопределение по ГНСС ГЛОНАСС/GPS [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://www.sdcм.ru/smglo/staticpages?version=rus&site=inner&title=precisepositioning>.
44. Руководство пользователя. Trimble Business Center / Trimble Navigation Limited. – 2008. – 618с.

45. Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS (ГКИНП (ОНТА) - 01-271 - 03). – М.: ЦНИИГАиК, 2003. – 66с.
46. Савчук С. До питання точності GPS-спостережень / С. Савчук, Н. Каблак, І. Калинич, І. Проданець // Геодезія, картографія і аерофотознімання: міжвідомчий наук.-техн. зб. – Л., 2007. – Вип. 68. – С. 105-108.
47. Савчук С.Г. Проблемні питання під час використання сучасних супутникових технологій визначення координат / С.Г. Савчук // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2007. – Вип. 69. – С. 20-33.
48. Серапинас Б. Б. Глобальные системы позиционирования / Серапинас Б.Б. – М.: ИКФ «Каталог», 2002. – 106 с.
49. Соловьев Ю. А. Системы спутниковой навигации / Соловьев Ю. А. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 268 с.
50. Супутникова система навігації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (Матеріал з Вікіпедії – вільної енциклопедії).
51. Торопа І.М. До питання тривалості GPS спостережень в залежності від довжин векторів / І.М. Торопа, Ю.Р. Пішко // Геодезія, архітектура та будівництво: матеріали IV міжнародної конференції молодих вчених ГАС-2011. – Львів: Вид-во "Львівська політехніка", 24-26 листопада, 2011. – С. 184-185.
52. Торопа І.М. Порівняння точності вимірів, які виконані різними типами GNSS-приймачів / І.М. Торопа, Ю.Р. Пішко // Геодезія. Землеустрій. Природокористування: присвячується пам'яті П.Г. Черняги: збірник тез – Рівне, 5-6 листопада 2014. – С. 51-54.
53. Точность навигационно-временных определений в ГНСС [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://lab-gnss.bmstu.ru/scripts/index.php?page=theory\\_9](http://lab-gnss.bmstu.ru/scripts/index.php?page=theory_9)(Учебно методическое обеспечение).
54. Третьяк К. Експериментальні дослідження точності GPS-системи SR-9500 Leica / К. Третьяк, Є. Черепанов //Сучасні досягнення геодезії, геодинаміки та геодезичного виробництва: зб. наук. пр. – Л., 1999. – С. 93-98.

55. Третьяк К.Р. До питання тривалості GPS-вимірів при побудові державних мереж 1-го та 2-го класу / К. Р. Третьяк, Т. М. Шушкова // Геодезія, картографія і аерофотознімання: міжвідомчий наук.-техн. зб. – Л., 2001. – Вип. 61. – С. 124-132.
56. Хода О. А. Определение координат перманентных станций региональной сети: GPS VS GPS+ГЛОНАСС / О. А. Хода // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17. – № 6. – С. 45-53.
57. Хрусталеv Д. GPS – взгляд изнутри. Спутниковая навигация и принципы построения приемников GPS и ГЛОНАСС / Д. Хрусталеv // Компоненты и технологии – 2001. – №6. – С. 5-7.
58. Цюпак І. Точність визначення координат пунктів і довжин ліній за сесіями GPS-спостережень різної тривалості / І. Цюпак // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. пр. – Л., 2012. – Вип. I (23). – С. 57-59.
59. Юркина М.И. Действующие системы координат в России / М.И. Юркина, Л.И. Серебрякова // Известия вузов "Геодезия и аэрофотосъемка". –2001. – № 3. – С. 40-53.
60. Ягупов В.В. Педагогіка: Навч. посібник / В.В. Ягупов. – К.: Либідь, 2002. – 560 с.
61. Янчук О.Є. Геодезичний моніторинг техногенно-навантажених територій: дис. к.т.н. 05.24.01 / Янчук Олександр Євгенович. – Рівне., 2011. – 173 с.
62. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС / Яценков В.С. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 272 с.
63. Abdallah A. T. M. Accuracy assessment study of using GPS for surveying applications in south Egypt: Master of science thesis / Ashraf Talaat Mohammad Abdallah. – A., 2009 – 208 p.
64. Accuracy Standards of Control Survey (Version 2.0) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.geodetic.gov.hk/smo/gsi/programs/en/GSS/GSI/svy\\_specifications.htm](http://www.geodetic.gov.hk/smo/gsi/programs/en/GSS/GSI/svy_specifications.htm).
65. Alcaay S. Comparing GLONASS-only with GPS-only and hybrid positioning in various length of baselines / S. Alcaay, C. Inal, C O. Yigit, M. Yetkin / Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica. – 2012. – Vol. 47(1). – P. 1-12.

66. Al-Shaery A. Assessment of network-based positioning performance using GPS alone versus GPS and GLONASS combined / Al-Shaery A., Lim S., C. Rizos // 24th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation. – Portland, Oregon, USA, 20-23 September 2011. – P 2341-2349.
67. Ashby N. Relativistic effects in the Global Positioning System / N. Ashby // Proceedings of the International Association of Geodesy (IAG): Symposia of the XIX General Assembly of IUGG. – Vancouver, Canada, 1987. – Vol. 1. – P. 41–50.
68. Banville S. Satellite and receiver phase bias calibration for undifferenced ambiguity resolution / S. Banville, R. Santerre, M. Cocard, R.B. Langley // Proceedings of ION NTM 2008: National Technical Meeting, The Institute of Navigation. – San Diego, CA, 28-30 January 2008. – pp. 711-719.
69. Berber M. Comparison of accuracy of GPS techniques / Mustafa Berbera, Aydin Ustun, Mevlut Yetkin // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. – August 2012. – Vol. 45, Issue 7. – P. 1742–1746
70. Beutler G. Accuracy and Biases in the Geodetic Application of the Global Positioning System / G. Beutler, I. Bauersima, S. Botton, W. Gurtner, M. Rothacher, T. Schildknecht // Manuscripta Geodaetica. – 1989. – Vol. 14. – P. 28-35.
71. Bhatta B. GNSS Surveying for GIS [Электронный ресурс] / B. Bhatta. – Режим доступа: <http://www.bbhatta.info/papers/Survey.pdf>.
72. Bruyninx C. Comparing GPS-only with GPS + GLONASS positioning in a regional permanent GNSS network / Carine Bruyninx // GPS Solutions. – 2007. – Vol. 11 (2). – P. 97-106.
73. Courses Online : Modern Surveying Techniques. Lecture 13 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/ИТ-КАНПУР/ModernSurveyingTech/ui/TOC1.htm>.
74. . Dach R. Bernese GPS Software version 5.0 / R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl // Berne: Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland. – 2007. – 612 p.
75. Dawod G. M. Proposed standards and specifications for GPS geodetic surveys in Egypt / Dawod G. M. // Water Science Magazine. – 2003. – No. 33. – P. 33-39.

76. Dawoud S. GNSS principles and comparison [Електронний ресурс] / S. Dawoud. – Режим доступу: [http://www.snet.tu-berlin.de/fileadmin/fg220/courses/WS1112/snetproject/gnss-principles-and-comparison\\_dawoud.pdf](http://www.snet.tu-berlin.de/fileadmin/fg220/courses/WS1112/snetproject/gnss-principles-and-comparison_dawoud.pdf).
77. Doberstein D. Fundamentals of GPS Receivers: A Hardware Approach / D. Doberstein. – Wien New York: Springer Science & Business Media, 2012 – 329 p.
78. Dodson A. Hybrid GPS + GLONASS / A. Dodson, T. Moore, D.F. Baker, J.W. Swann // GPS Solutions. – 1999. – Vol. 3, № 1. – P. 32-41.
79. Dogan U. Accuracy analysis of relative positions of permanent GPS stations in the Marmara region, Turkey/ U. Dogan // Survey Review. – 2007. – Vol. 39, №304. – P. 156-165.
80. Dow J. M. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems / J. M. Dow, R. E. Neilan, C. Rizos // Journal of Geodesy. – 2009. – Vol. 83, № 3-4. – P. 191-198.
81. Eckl M.C. Accuracy of GPS-derived relative positions as a function of interstation distance and observing session duration / M.C. Eckl, R.A. Snay, T. Soler, M.W. Cline and G.L. Mader // Journal of Geodesy. – 2001. – Vol. 75, №12. – P. 633-640.
82. El-Rabbany A. Introduction to GPS. The Global Positioning System / Ahmed El-Rabbany. – Boston, London: Artech House, 2002. – 169 p.
83. Essen L. The refractive indices and dielectric constants of air and its principal constituents at 24 000 Mc/s / L. Essen, K. Froome // Proceedings of Physical Society. – 1951. – P. 862-875.
84. Figurski M. Od czego zalezy dokladnosc wyznaczenia wspolrzednych w GPS Walka o milimetry / M. Figurski // NAWI: dodatek miesiecznika GEODETA. – 2009. – №1 (19). – P. 4-9.
85. Gargula T. An attempt of using one frequency GPS receivers to determination of geodetic networks / T. Gargula, M. Pogan, A. Pieszka // Геодезія, картографія і аерофотознімання: міжвідомчий наук.-техн. зб. – Л., 2007. – Вип. 69. – С. 73-78.
86. Gibson R. A derivation of relativistic effects in satellite tracking / R. Gibson // Technical Report, Naval Surface Weapon Center, Dahlgren (Virginia, USA). – 1987. – P. 83-55.

87. Gleason S. GNSS Applications and Methods / S. Gleason, D. Gebre-Egziabher. – Boston, London: Artech House, 2009. – 528 p.
88. Global Navigation Satellite System GLONASS: Interface Control Document (Edition 5.1). – Moscow, 2008. – 50 p.
89. Global Positioning System (GPS) Survey Specifications. California Department of Transportation, 2006. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ncdot.gov/doh/preconstruct/highway/location/support/support\\_files/documents/manuals/locationgps0202.pdf](http://www.ncdot.gov/doh/preconstruct/highway/location/support/support_files/documents/manuals/locationgps0202.pdf).
90. GNSS Planning Online – Trimble [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/Settings](http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/Settings).
91. GPS + Glonass. Using the best of both worlds [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.telit.com/files/en/discover/special\\_reports/Telit\\_WP\\_GPS\\_Glonass\\_1211.pdf](http://www.telit.com/files/en/discover/special_reports/Telit_WP_GPS_Glonass_1211.pdf).
92. GPS guidebook. Standards and Guidelines for Land Surveying Using Global Positioning System Methods. – State of Washington Department of Natural Resources, 2004. – 66 p.
93. GPS Standards and Guidelines for Legal Surveying [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.surveyors.nf.ca/gpsguide>.
94. Grewal M. S. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration / M. S. Grewal, A. P. Andrews C. G. Bartone. – Third edition // John Wiley & Sons Ltd. – 2013. – 608 p.
95. Griffiths J. IGS Classic Products, Status and Towards the Future / J. Griffiths, K. Choi // International GNSS Service Workshop Symposium. Olsztyn, Poland, 23 – 27 July 2012. – 33 p.
96. Groves P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems / P. D. Groves. – Second edition. – Artech House, 2013 – 800 p.
97. Guideline for Continuously Operating Reference Stations. Special Publication. Version 2.0. – Intergovernmental Committee on Survey and Mapping, 2008. – 41p.
98. Guideline for Control Surveys by GNSS. Special Publication 1. Version 2.0. – Intergovernmental Committee on Survey and Mapping, 2012. – 14p.

99. Guidelines and Specifications for Global Navigation Satellite System Land Surveys in Connecticut. – The Connecticut Association of Land Surveyors, Inc, 2008. – 12 p.
100. Guidelines for the use of GNSS in land surveying and mapping. 2nd edition. – RICS guidance note, 2010. – 82p.
101. Habrich H. Geodetic applications of the Global Navigation Satellite System (GLONASS) and of GLONASS/GPS combinations. PhD Dissertation. - Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland, 1999. – 137p.
102. Häkli P. Assessment of Practical 3-D Geodetic Accuracy for Static GPS Surveying [Электронный ресурс] / P. Häkli, H. Koivula, J. Puupponen // International Federation of Surveyors (FIG) Working Week 2008, 14-19 June, Stockholm, Sweden – Режим доступа: <http://www.fig.net/pub/fig2008/techprog.htm>.
103. Heng L. Overcoming RFI with high mask angle antennas and multiple GNSS constellations / L. Heng, T. Walter, P. Enge, G. Xingxin Gao // in Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2013+). – Nashville, TN, Sep. 2013. – pp. 3433-3442.
104. Hofmann-Wellenhof B. Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle. – Wien New York: Springer, 2008. – 516 p.
105. Hofmann-Wellenhof B. GNSS – Global Navigation Satellite System / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Walse // Springer, Wien, NewYork. – 2008. – 343 p.
106. Hofmann-Wellenhof B. Navigation. Principles of positioning and guidance / B. Hofmann-Wellenhof, K. Legat, M. Wieser. – Wien New York: Springer Science & Business Media, 2003 – 427 p.
107. Horemuz M. Processing of the Slovak part of GPS campaign CS-NULRAD-92 / M. Horemuz, Sirfa J. // Reports on geodesy. – 1995. – No. 4(17). – P. 35 - 42.
108. Ineichen D. Processing combined GPS/GLONASS data at swisstopo's local analysis center / D. Ineichen, E. Brockmann, S. Schaer // Proceedings of EUREF Symposium: EUREF Publication, No.18. – Brussels, Belgium 18–20 June 2008.



109. IS-GPS-200F (2011) Navstar GPS Space Segment, Navigation User Segment Interfaces, ISGPS-200, 21-Sep-2011, Global Positioning Systems directorate. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200F.pdf> (last accessed March 2012).
110. Kaplan E. D. Understanding GPS. Principles and Applications / Elliott D. Kaplan, Christopher J. Hegarty. – [Second Edition]. – Boston, London: Artech House, 2006. – 665 p.
111. Klobuchar J.A. Ionospheric Effects on GPS / J.A. Klobuchar; edited by B.W. Parkinson, J. J. Spilker // Global Positioning System: Theory And Applications. – USA, Washington: AIAA. – 1996. – Vol. 1. – P. 679 - 862
112. Kouba J. Relativistic time transformations in GPS / Kouba J. // GPS Solutions. – 2002. – Vol. 5, № 4. – P. 1 - 9.
113. Kuzin S. On the role of GLONASS for the development of the Russian geodetic reference network / S. Kuzin, V. Mitrikas, S. Revniviykh, S. Tatevyan // Artificial satellites. – 2007. – Vol. 42, № 2. – P. 113 - 120.
114. Lange A.F. Differential GPS Update / A.F. Lange, R. Buick [V.H. Singhroy, D.T. Hansen, R.R. Pierce, A.I. Johnson] // Spatial methods for solution of environmental and hydrologic problems - Science, Policy and Standardization, ASTM STP 1420 / ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003 – P. 18-25.
115. Leick A. GLONASS satellite surveying / A. Leick // Journal of Surveying Engineering. – 1998. – Vol. 124. – P. 91-99.
116. Leick A. GPS Satellite Surveying / Leick A. – [2nd Edition]. – Wiley-Interscience. – 584 p.
117. Leick A. Processing GLONASS carrier phase observations: theory and first experience / A. Leick, J. Li, Q. Beser, G. Mader. 8th International Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation GPS ION'95. – Palm Springs, California, 12-15 September, 1995. – P. 1041-1047.
118. Li Z. GPS multipath detection and reduction using spectral technique / Z. Li, K. P. Schwarz, A. El-Mowafy // General meeting of IAG at Beijing, P.R. – China, August 8-13, 1983.

119. MacDonald D. Should I Use Precise Ephemeris? [Электронный ресурс] / D. MacDonald // Waypoint Consulting Inc. – November 2001. – Режим доступа: <http://www.sokkia.com.tw/novatel/Documents/Waypoint/Reports/ephemeris.pdf>
120. Marder G. L. GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey [Электронный ресурс] / G. L. Marder. – 2004. – Англ. – Режим доступа: <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>
121. Marreiros P. Kinematic GNSS Precise Point Positioning: Ph.D. Thesis in Surveying Engineering / João Paulo Ramalho Marreiros. – University of Porto, 2012. – 161 с.
122. Martin D. J. GPS Basics: Around and Around with Orbits [Электронный ресурс] / D. J. Martin // Professional Surveyor. – 2003. – Vol. 23(6). – Режим доступа: <http://www.profsurv.com/magazine/article.aspx?i=1083>.
123. Navstar Global Positioning System [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.globalsecurity.org/space/systems/gps.htm>.
124. Niell A.E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths / A.E. Niell // Journal of Geophysical Research: Solid Earth – 1996. – Volume 101, Issue B2. – P. 3227-3246
125. Poradnik użytkownika / [Poradnik opracował zespół w składzie: Wiesław Graszka, Artur Oruba, Marcin Ryczywolski, Szymon Wajda]. – [Wydanie 2, poprawione i uzupełnione]. – Główny Urząd Geodezji i Kartografii, 2013. – 69p.
126. Precyzyjne pozycjonowanie w oparciu o GNSS. Załącznik nr 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://bip.msw.gov.pl/download/4/9204/Zalacznik\\_nr\\_2\\_do\\_rozporzadzenia.pdf](http://bip.msw.gov.pl/download/4/9204/Zalacznik_nr_2_do_rozporzadzenia.pdf)
127. Principles and Practice of GPS Surveying [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps\\_survey/principles\\_gps.htm](http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps_survey/principles_gps.htm).
128. Proposed standards and specifications for GPS geodetic surveys in Egypt. – Goma M. Dawod Researcher, Survey Research Institute [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://nwrc-egypt.academia.edu/Gomaadawod/Papers/822955/PROPOSED\\_STANDARDS\\_AND\\_SPECIFICATIONS\\_FOR\\_GPS\\_GEODETTIC\\_SURVEYS\\_IN\\_EGYPT](http://nwrc-egypt.academia.edu/Gomaadawod/Papers/822955/PROPOSED_STANDARDS_AND_SPECIFICATIONS_FOR_GPS_GEODETTIC_SURVEYS_IN_EGYPT).

129. Psimoulis P. A. Estimating the optimum duration of GPS static observations for short baseline length determination in Greece [Электронный ресурс] / P. A. Psimoulis, V. A. Kontogianni, A. Nickitopoulou, S. I. Pytharouli, P. Triantafyllidis, S. C. Stiros // FIG Working Week 2004, 22-27 May, Athens, Greece. – Режим доступа: [http://www.fig.net/pub/athens/papers/ts29/TS29\\_5\\_Psimoulis\\_et\\_al.pdf](http://www.fig.net/pub/athens/papers/ts29/TS29_5_Psimoulis_et_al.pdf).
130. RGP – IGN [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rgp.ign.fr>
131. Richharia M. Satellite Systems for Personal Applications: Concepts and Technology / M. Richharia, L. D. Westbrook // John Wiley & Sons Ltd, – 2010. – 476 p.
132. RINEX Viewer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://javad.com/jgnss/products/software/rinex\\_viewer.html](http://javad.com/jgnss/products/software/rinex_viewer.html).
133. Rizos Ch. Principles and Practice of GPS Surveying [Электронный ресурс] / Ch. Rizos. – Version 1.1, September 1999. – Режим доступа: [http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps\\_survey](http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps_survey).
134. Rogowski J. Method of establishing geodetic networks in the areas of intensive mining in homogenous coordinate system / J. Rogowski, M. Figurski, L. Kujawa, M. Piraszewski // Reports on geodesy. – 1995. – No. 4(17). – P. 43-61.
135. Rose J. A. R. The use of ionospheric tomography and elevation masks to reduce the overall error in single-frequency GPS timing applications. Advances in Space Research / J. A. R. Rose, J. R. Tong, D. J. Allain, C. N. Mitchell // Advances in Space Research. – 2011. – Vol. 47(2). – P. 276-288.
136. Schmid R. Generation of a consistent absolute phase center correction model for GPS receiver and satellite antennas / G. Gendt, M. Ge, M. Rothacher, P. Steigenberger, R. Schmid // Journal of Geodesy. – 2007. – Volume 81, Issue 12. – P. 781 -798.
137. Scripps Orbit and Permanent Array Center [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sopac.ucsd.edu>.
138. Seeber G. Satellite Geodesy / Günter Seeber. – [2nd completely revised and extended edition]. – Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 2003. – 589 p.

139. Śledziński J. Błędy geometrii i technologii / J. Śledziński // NAWI: dodatek miesięcznika GEODETA. – 2005. – №6 (8). – P. 3-4.
140. Śledziński J. Błędy geometrii i technologii / J. Śledziński // NAWI: dodatek miesięcznika GEODETA. – 2005. – №2 (4). – P. 3-4.
141. Snay R. A .GPS precision with carrier phase observations: does distance and/or time matter? [Електронний ресурс] / R. A. Snay, T. Soler, M. Eckl // Professional Surveyor Magazine. – 2002. – Vol. 22, № 10. – Режим доступу: <http://www.profsurv.com/magazine/archives.aspx>.
142. Soler T. Accuracy of OPUS solutions for 1- to 4-h observing sessions / T. Soler, P. Michalak, N.D. Weston, R.A. Snay, R.H. Foote // GPS Solutions. – 2006. –Vol. 10, № 1. – P. 45-55.
143. Sources of error in GNSS [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.blackroc.com/gps-and-positioning/errors/>
144. Spilker J. GPS signal structure and performance characteristics / J. Spilker. // The Institute of Navigation: Global Positioning System. – 1999. – Vol. 1. – P. 29–54.
145. Spilker J.J. Tropospheric effects on GPS / J.J. Spilker; edited by B.W. Parkinson, J. J. Spilker // Global Positioning System: Theory And Applications. – USA, Washington: AIAA. – 1996. – Vol. 1. – P. 517 - 546
146. Springer T. GPS, GLONASS, and More. Multiple Constellation Processing in the International GNSS Service / T. Springer, R. Dach // GPS World. – 2010. – Vol. 21(6). – P. 52-58.
147. Static Baseline Accuracies as a Function of Baseline Length, Observation Time and the Effect of using the Precise Ephemeris [Електронний ресурс] // Waypoint Consulting Inc. – September 2005. – Режим доступу: [http://webone.novatel.ca/assets/Documents/Waypoint/Reports/Static\\_Accuracies.pdf](http://webone.novatel.ca/assets/Documents/Waypoint/Reports/Static_Accuracies.pdf)
148. Swiss Positioning Service (swipos) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.swipos.ch>
149. The International GNSS Service (IGS) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>
150. Trimble Geomatics office. User Guide /Trimble Navigation Ltd. – 2001. – 113 p.

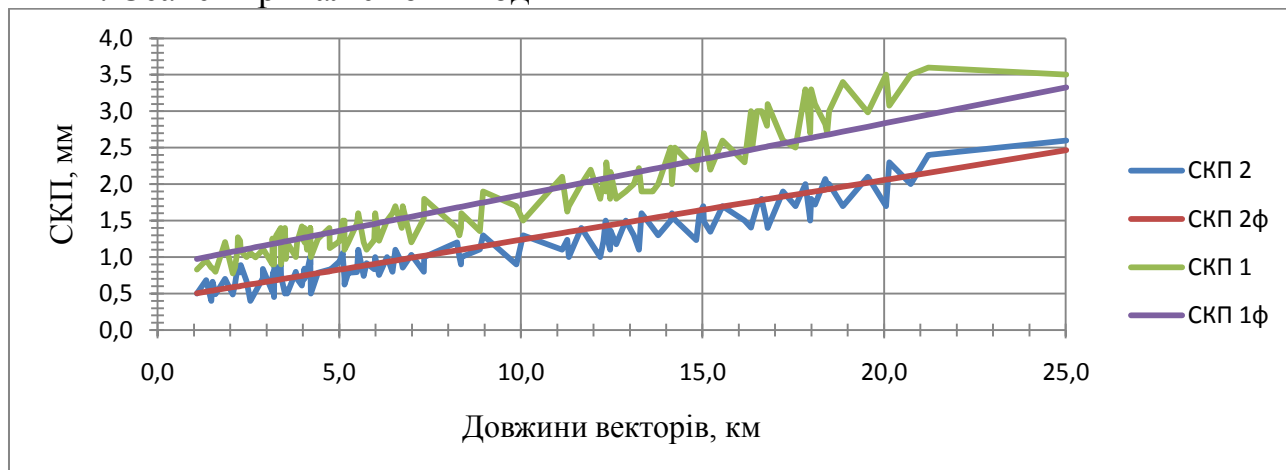
151. TxDOT Survey Manual / Texas Department of Transportation, 2011. – 338 p. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/ess/manual\\_notice.htm](http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/ess/manual_notice.htm).
152. Wang J. GPS and GLONASS integration: Modelling and ambiguity resolution issues / J. Wang, C. Rizos, M.P. Stewart, A. Leick // *GPS Solutions*. – 2001. – Vol. 5(3). – P. 55-64.
153. Web Mission Planning – Spectra Precision Surveying [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.ashtech.com/web-mission-planning-2712.kjsp](http://www.ashtech.com/web-mission-planning-2712.kjsp).
154. Wells D. E. Guide to GPS positioning / Wells, D. E.; Beck, N.; Delikaraoglou, D.; Kleusberg, A.; Krakiwsky, E. J.; Lachapelle, G.; Langley, R. B.; Nakiboglu, M.; Schwarz, K.-P.; Tranquilla, J. M.; Vaniček, P. – Fredericton, New Brunswick: Canadian GPS Associates, 1987. – 602 p.
155. Willis P. IGEX: International GLONASS experiment – scientific objectives and preparation / P. Willis, G. Beutler, W. Gurtner, G.W. Hein, R.E. Neilan, C. Noll, J. Slater // *Advances in Space Research*. – 1999. – Vol. 23, № 4. – P. 659-663.
156. Wykorzystanie systemu ASG-EUPOS do wykonania prac geodezyjnych i kartograficznych. – (Główny urząd geodezji i kartografii. Departament geodezji kartografii i systemów informacji geograficznej) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.asgeupos.pl/webpg/graph/img/\\_news/00051/w5k.pdf](http://www.asgeupos.pl/webpg/graph/img/_news/00051/w5k.pdf).
157. Xu G. GPS – theory, algorithms and applications / Xu G.. – [2nd edition]. – Springer: Wien, NewYork. – 2007. – 353 p.
158. Yahya M. H. The influence of different processing parameters on estimated variation of GPS positioning [Электронный ресурс] / M. H. Yahya, M. N. Kamarudin. – Режим доступа: <http://www.fksg.utm.my/geomatic/geomatic%20publication/2008/fulldoc/3.ISG2008-2.pdf>.
159. Zalecenia techniczne. Pomiarы satelitarne GNSS oparte na systemie stacji referencyjnych ASG-EUPOS, 2011. – 23 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.asgeupos.pl/index.php?wpg\\_type=dwnld&sub=standards](http://www.asgeupos.pl/index.php?wpg_type=dwnld&sub=standards) .

160. Zhu S. Relativistic effects in GPS / S. Zho, E. Groten // GPS-techniques applied to geodesy and surveying. Springer, Berlin, Heidelberg, New, York, London, Paris, Tokyo, Lecture Notes in Earth Sciences. – 1988. – Vol. 19.
161. Zinoviev A. E. Using GLONASS in combined GNSS receivers: Current status / A. E. Zinoviev // 18th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2005). – Long Beach, CA, September 2009 – P. 1046-1057.

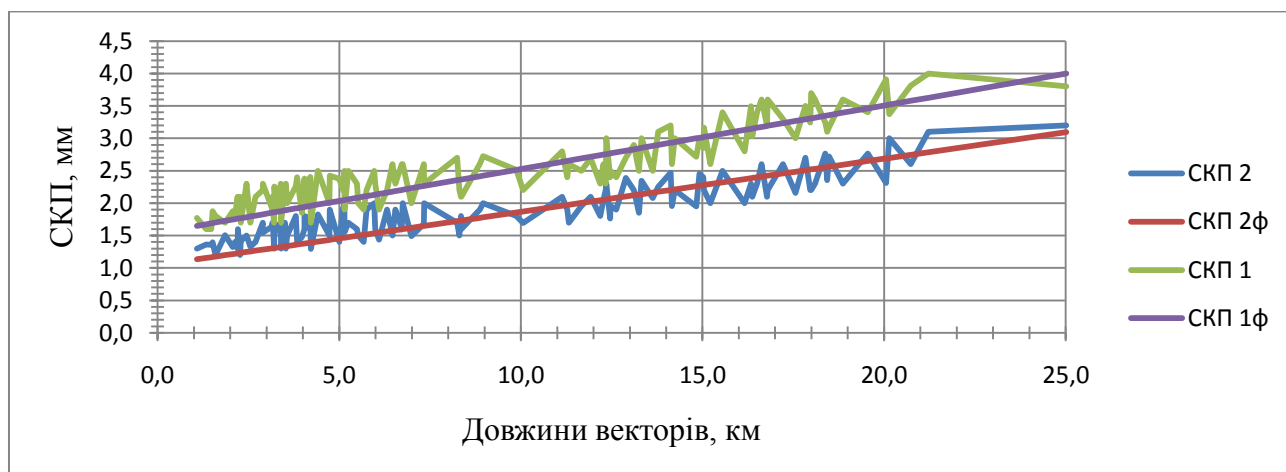
## Додаток А

За отриманими зі спостережень значеннями СКП довжин векторів мережі №1, а також їхніми значеннями обчисленими за формулами (2.8) та (2.9) побудовані графіки:

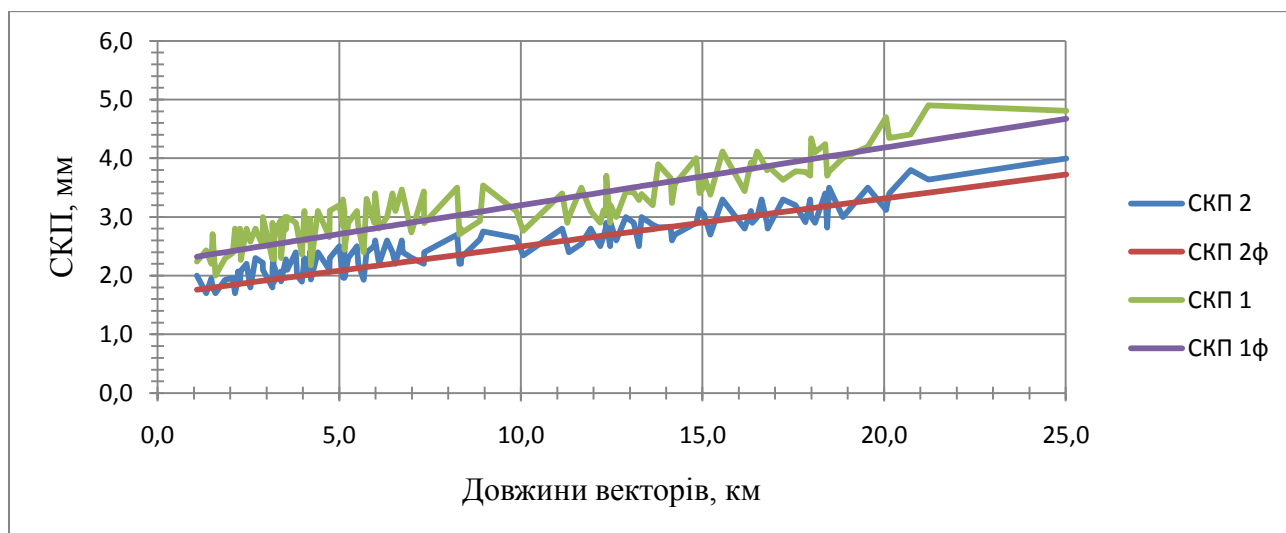
### 1. Сеанси тривалістю 24 години



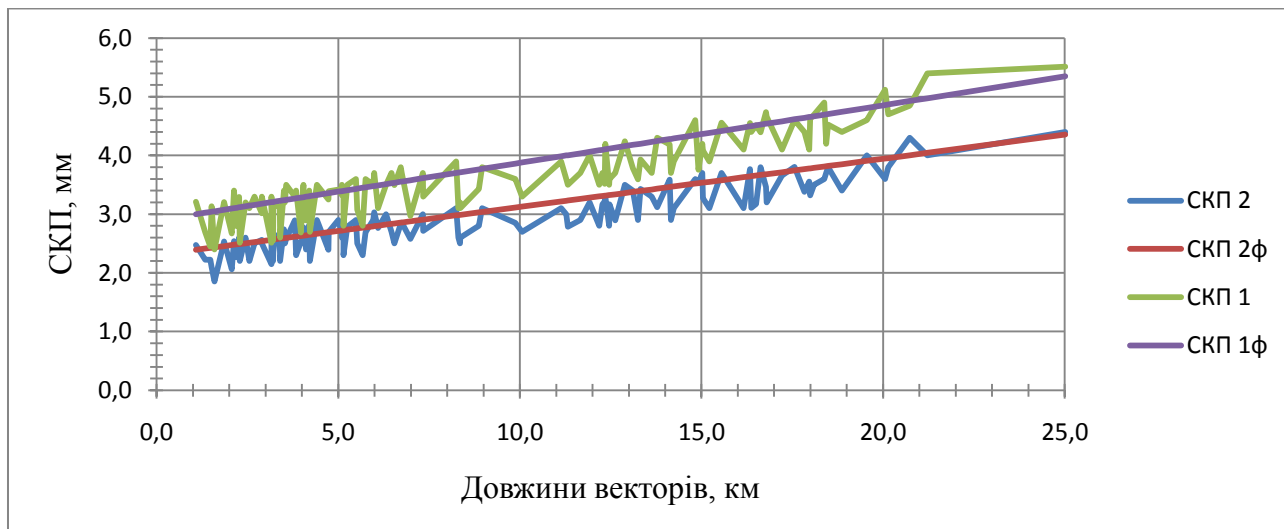
### 2. Сеанси тривалістю 12 годин



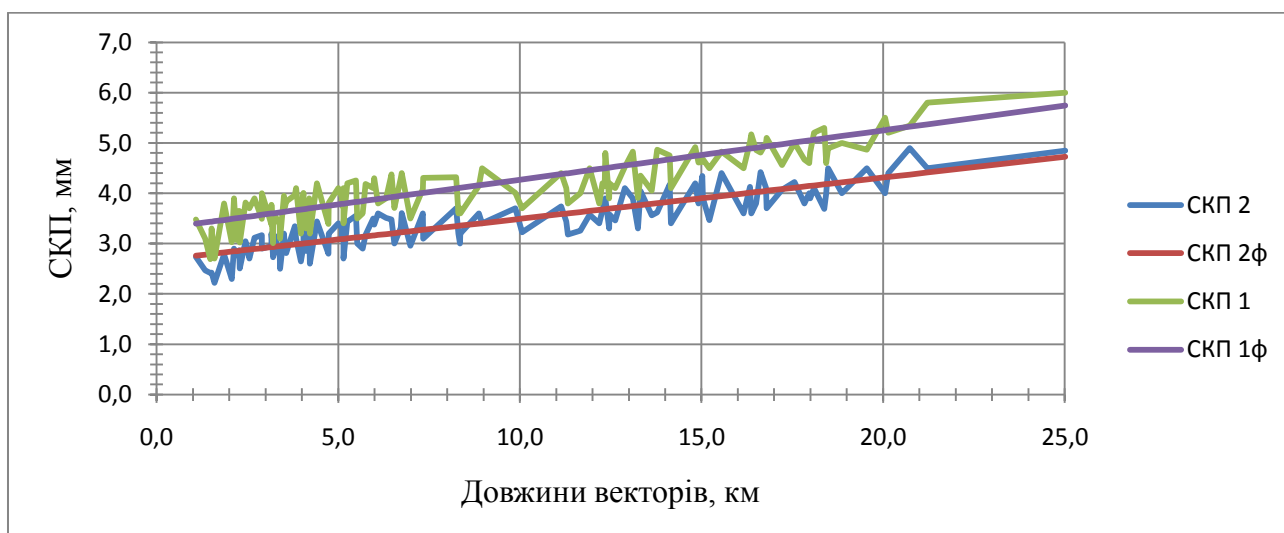
### 3. Сеанси тривалістю 6 годин



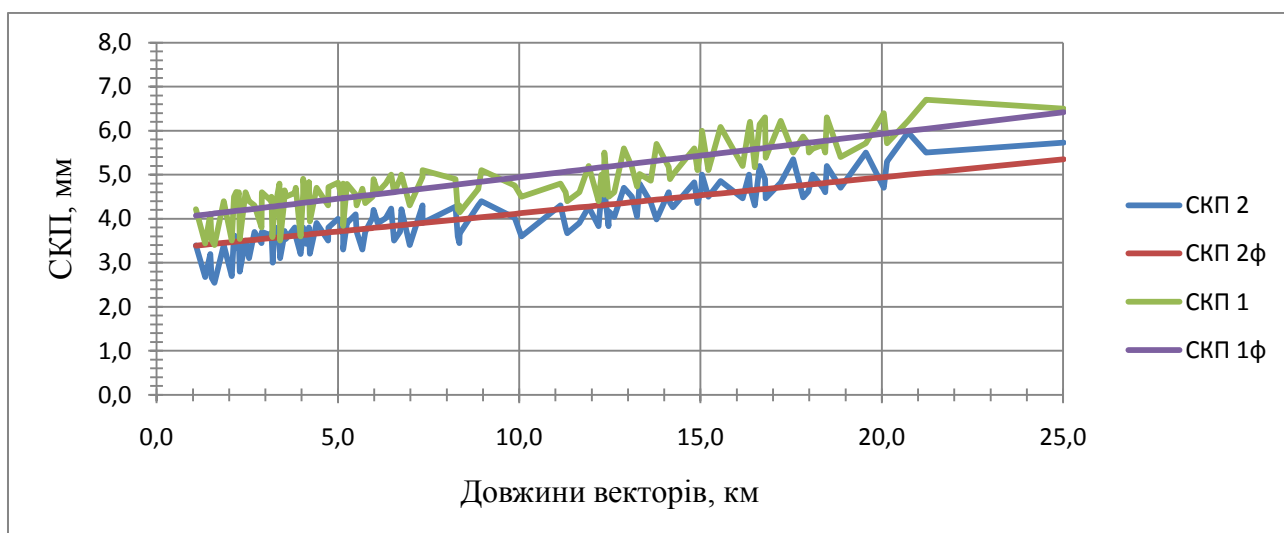
## 4. Сеанси тривалістю 3 години



## 5. Сеанси тривалістю 2 години



## 6. Сеанси тривалістю 1 година





## 7. Сеанси тривалістю 0,5 години

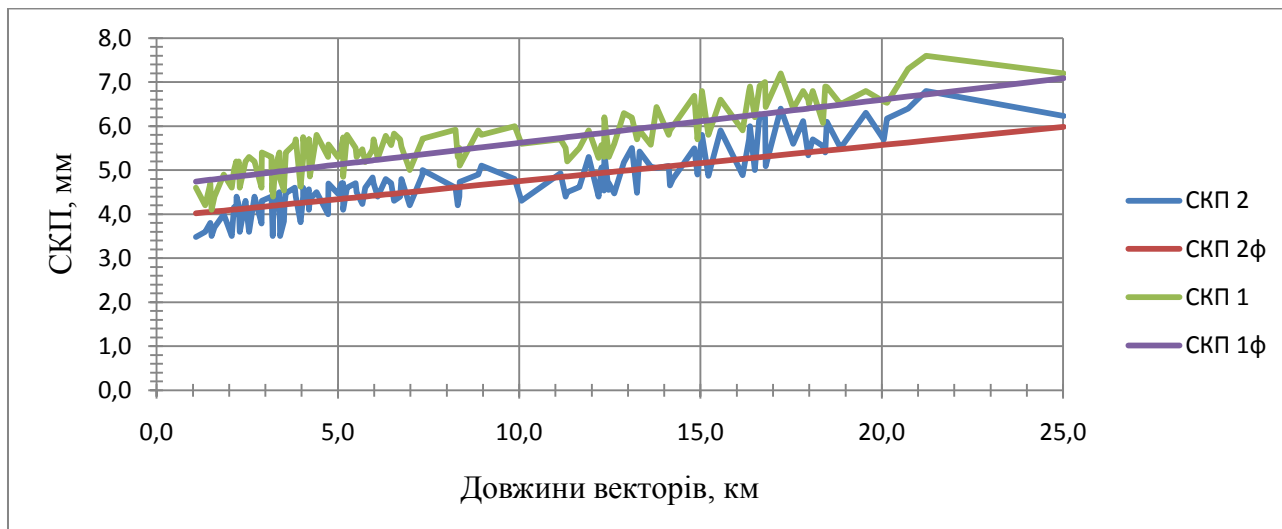
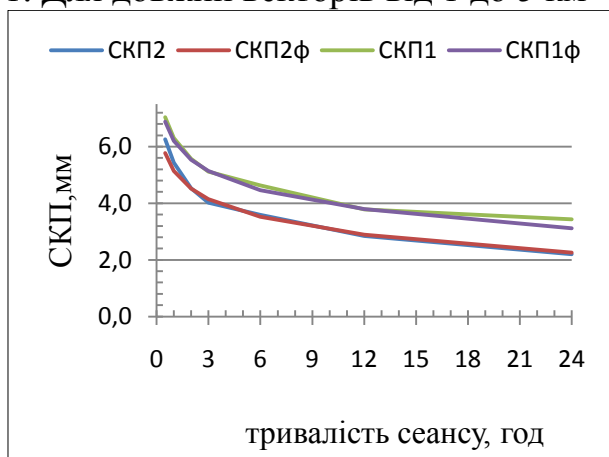
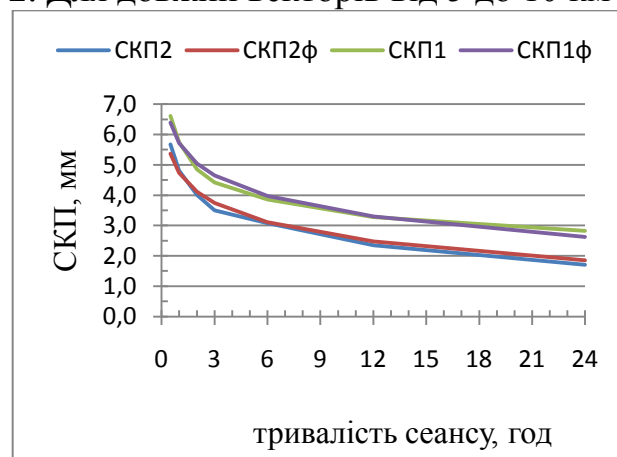


Рис. А.1. Графіки СКП довжини векторів, отриманих за результатами спостережень односистемними двочастотними та односистемними одночастотними приймачами, при тривалості спостережень 24 год, 12, 6, 3, 2, 1, 0,5 год та віддалях між приймачами від 1 до 25 км.

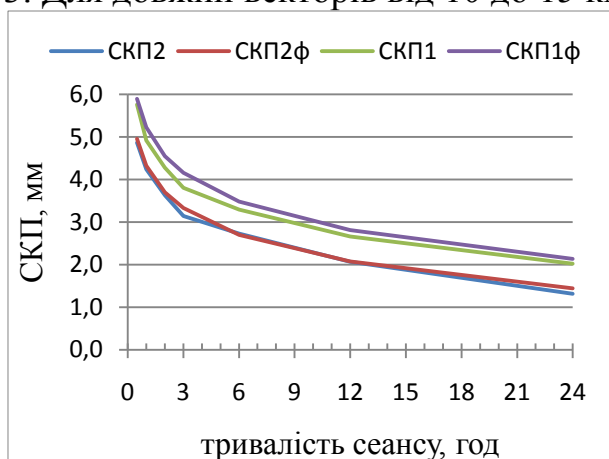
## 1. Для довжин векторів від 1 до 5 км



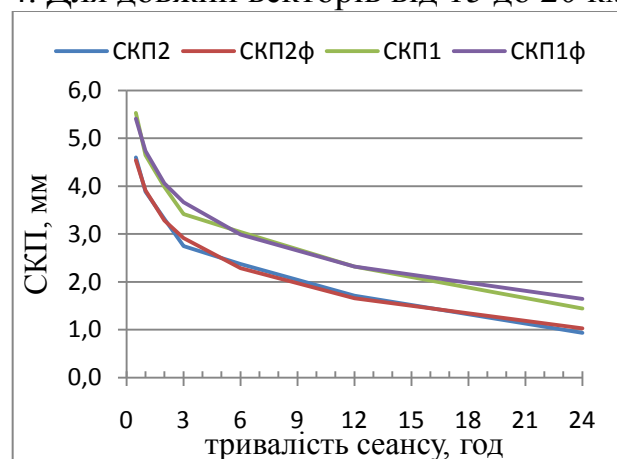
## 2. Для довжин векторів від 5 до 10 км



## 3. Для довжин векторів від 10 до 15 км



## 4. Для довжин векторів від 15 до 20 км



### 5. Для довжин векторів від 20 до 25 км

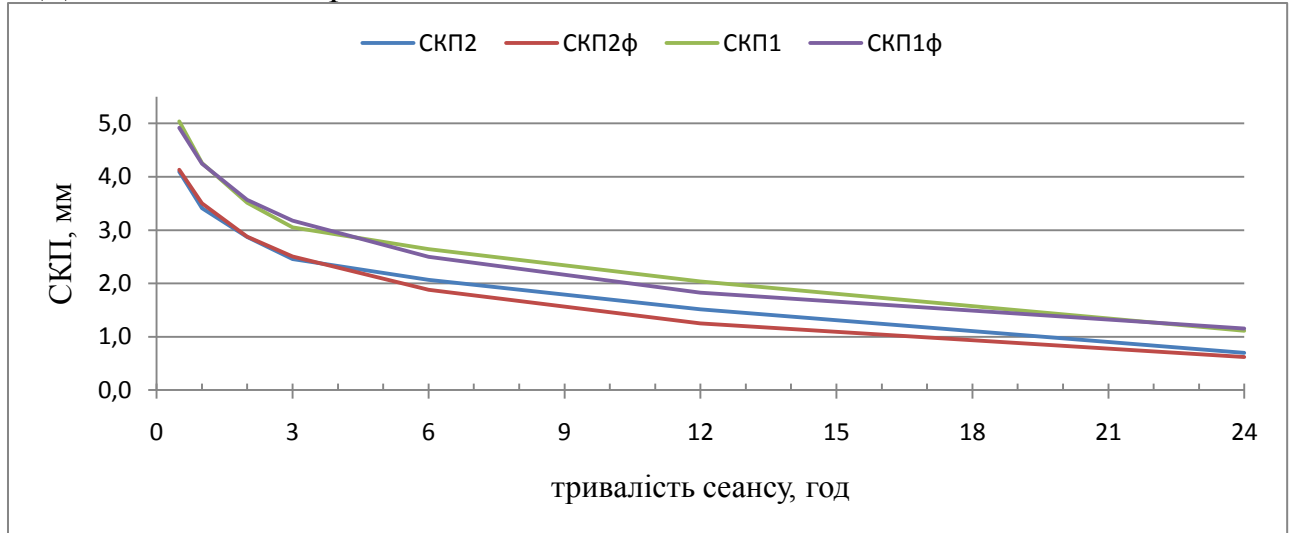


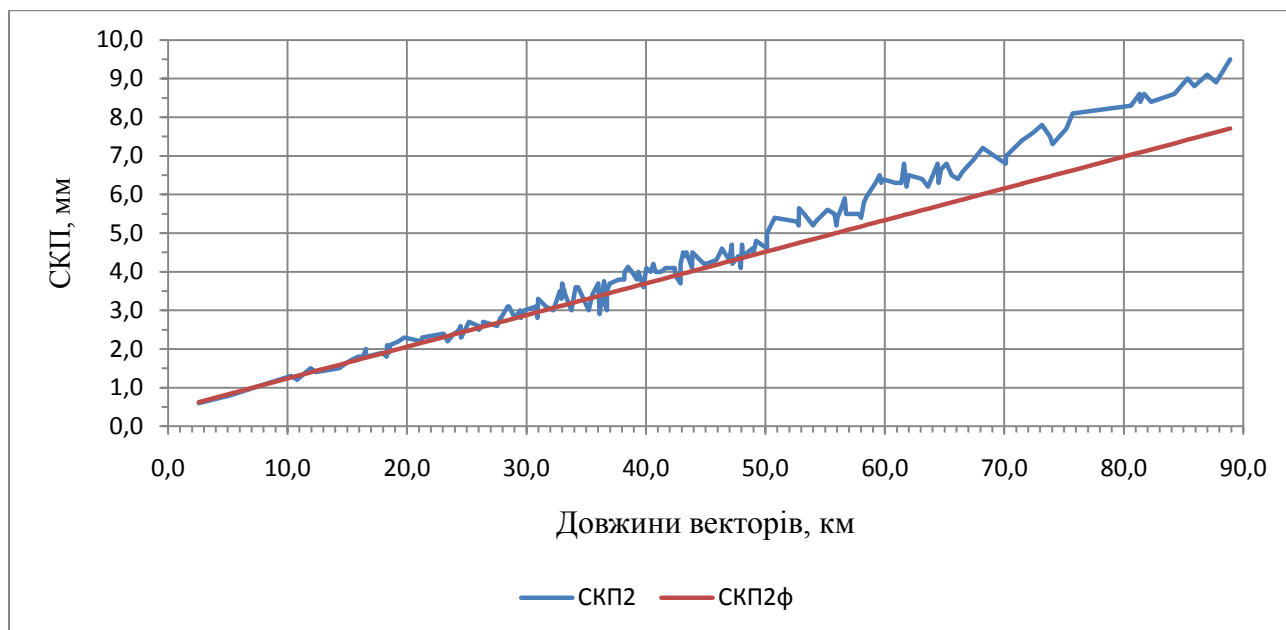
Рис. А.2. СКП довжин векторів, отриманих за результатами спостережень односистемними двочастотними та односистемними одночастотними приймачами, при тривалості спостережень: 24, 12, 6, 3, 2, 1 та 0,5 години для довжин векторів 2,5, 7,5, 12,5, 17,5 та 22,5 км.

На графіках (рис. А.1, А.2) показані: СКП2 – середні квадратичні помилки довжин векторів визначені за результатами спостережень двочастотними приймачами; СКП2ф – СКП довжин векторів, значення яких обчислені за рівнянням регресії для двочастотних приймачів (2.8); СКП1 – СКП визначені за результатами спостережень одночастотними приймачами; СКП1ф – СКП визначені за рівнянням регресії для одночастотних приймачів (2.9).

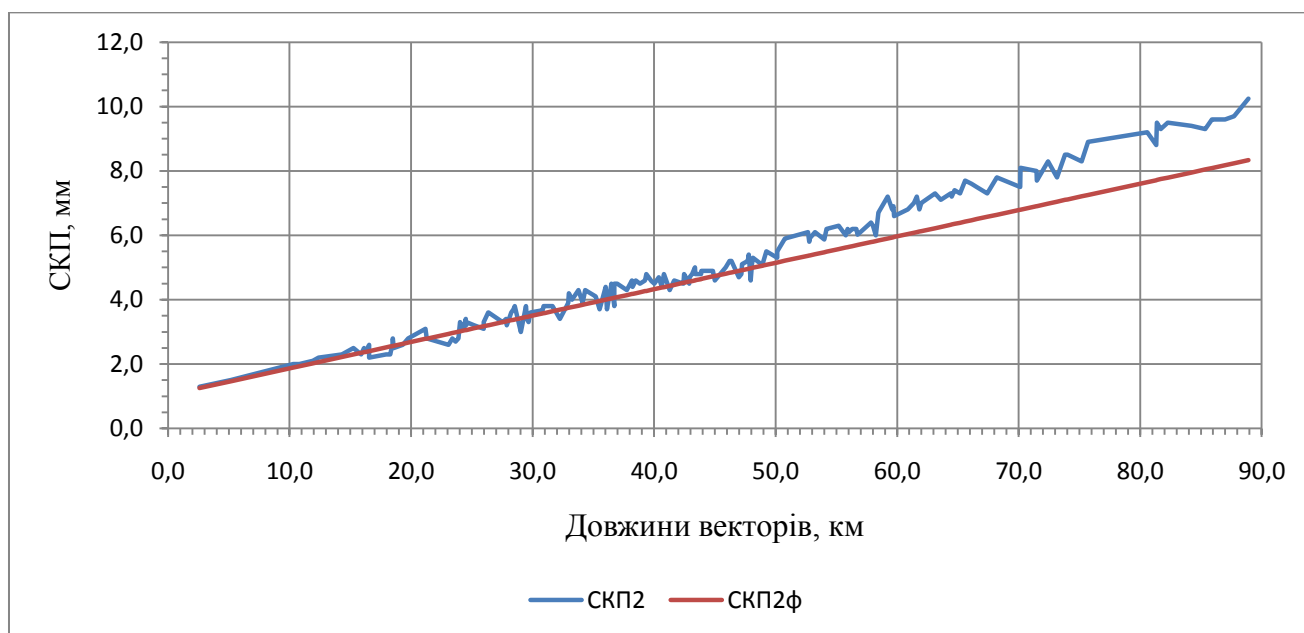
За отриманими зі спостережень значеннями СКП довжин векторів мережі №2, а також їхніми значеннями обчисленими за формулами (2.8) та (2.9) побудовані графіки для двосистемних двочастотних та двосистемних одночастотних приймачів.

- Для двочастотних приймачів:

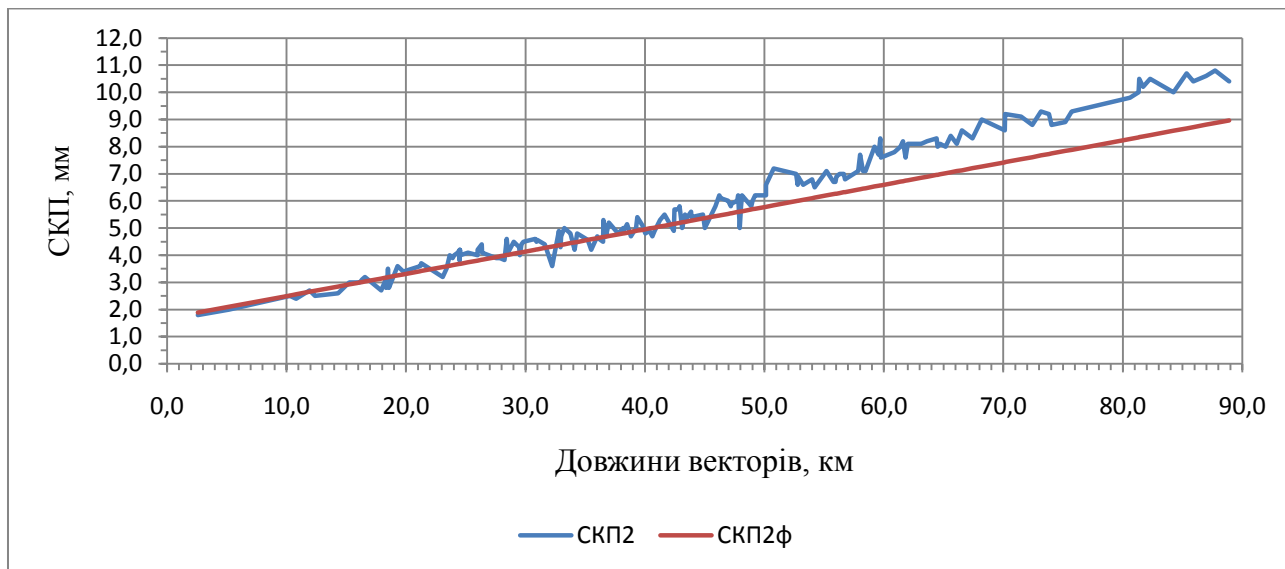
### 1. Сеанси тривалістю 24 години



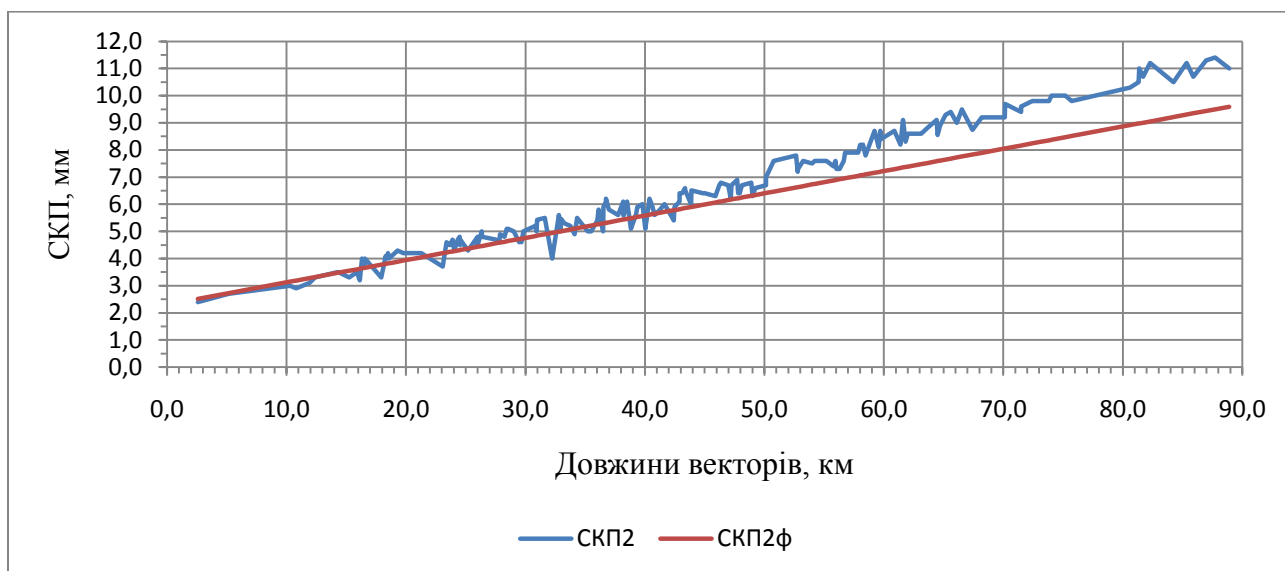
### 2. Сеанси тривалістю 12 годин



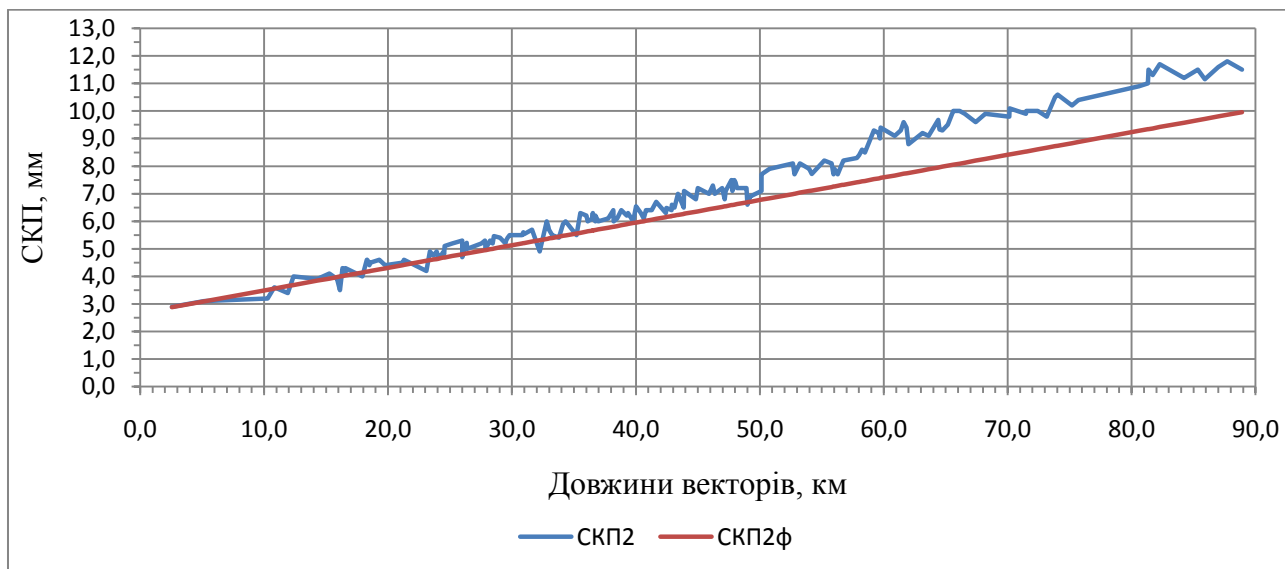
## 3. Сеанси тривалістю 6 годин



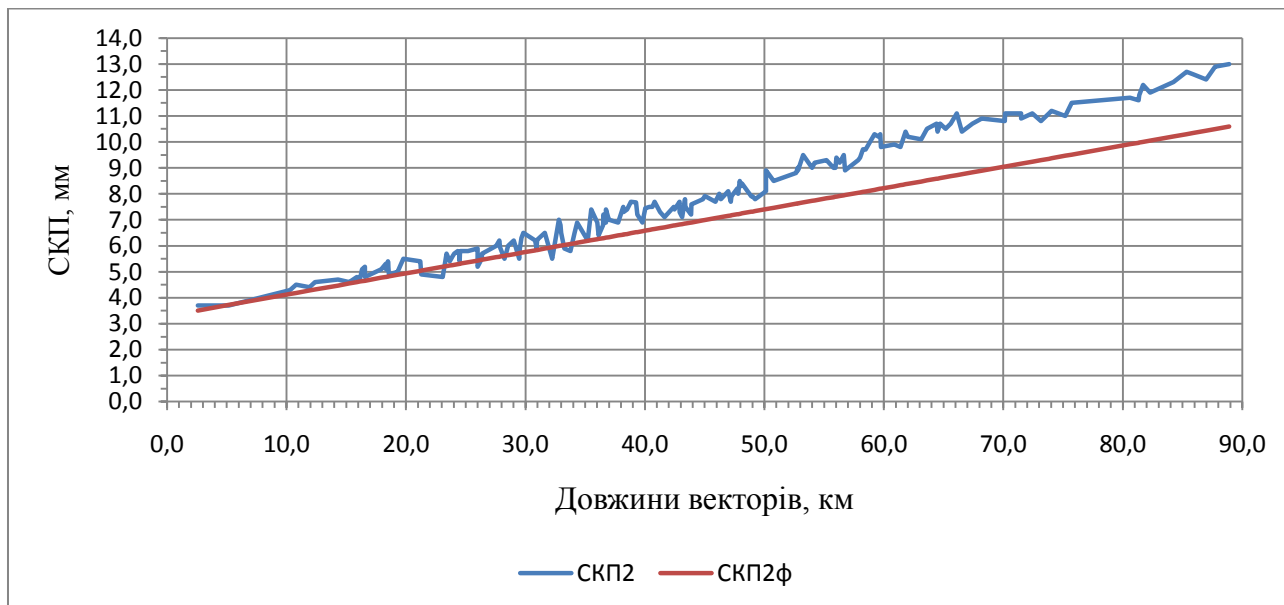
## 4. Сеанси тривалістю 3 години



## 5. Сеанси тривалістю 2 години



## 6. Сеанси тривалістю 1 година



## 7. Сеанси тривалістю 0,5 години

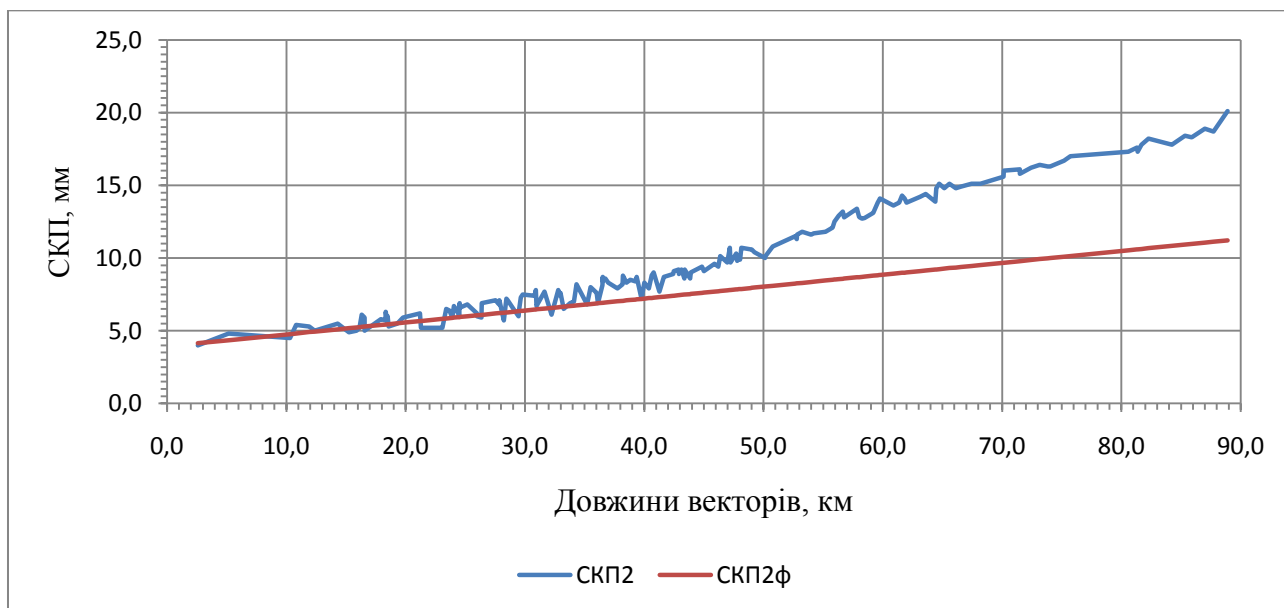
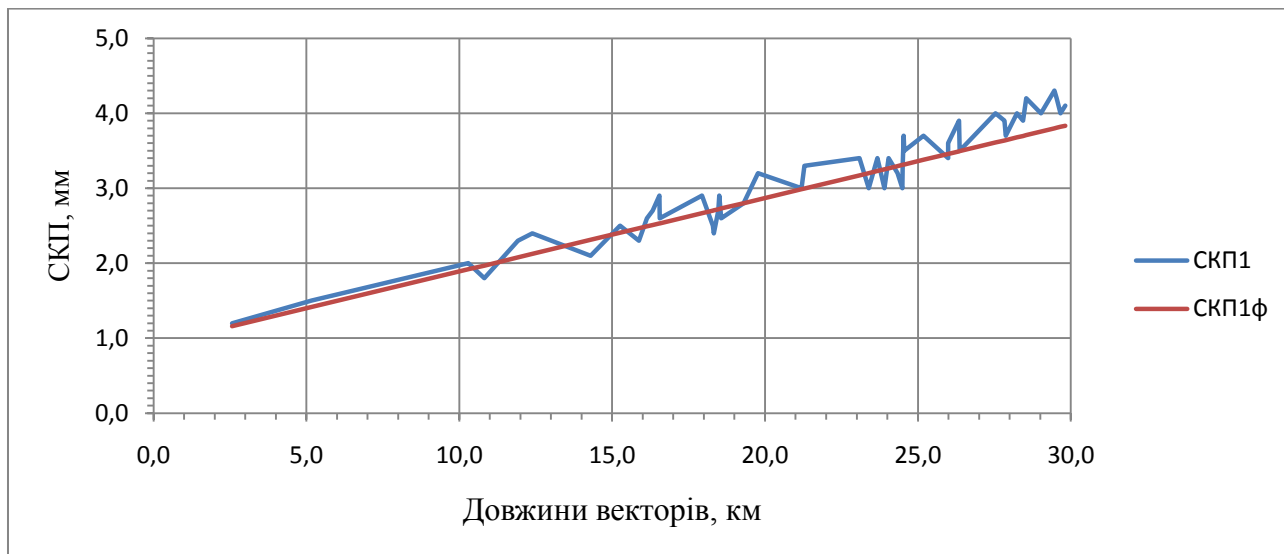


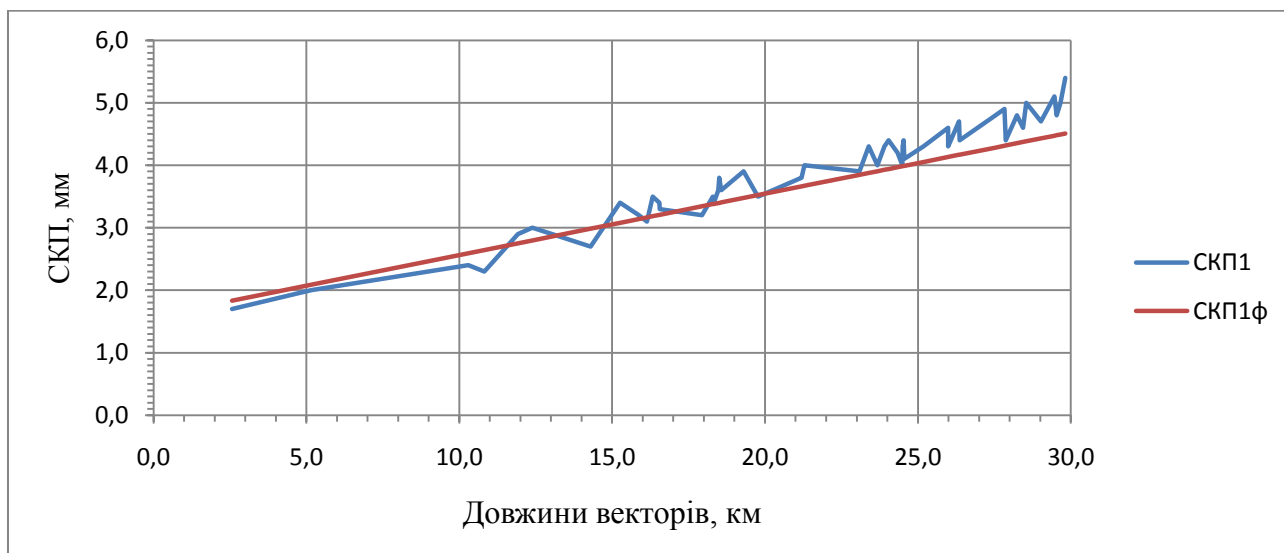
Рис. А.3. Графіки СКП довжини векторів, отриманих за результатами спостережень двосистемними двочастотними приймачами, при тривалості спостережень: 24, 12 6, 3, 2, 1 та 0,5 години та віддалях між приймачами від 3 до 89 км

- Для одночастотних приймачів:

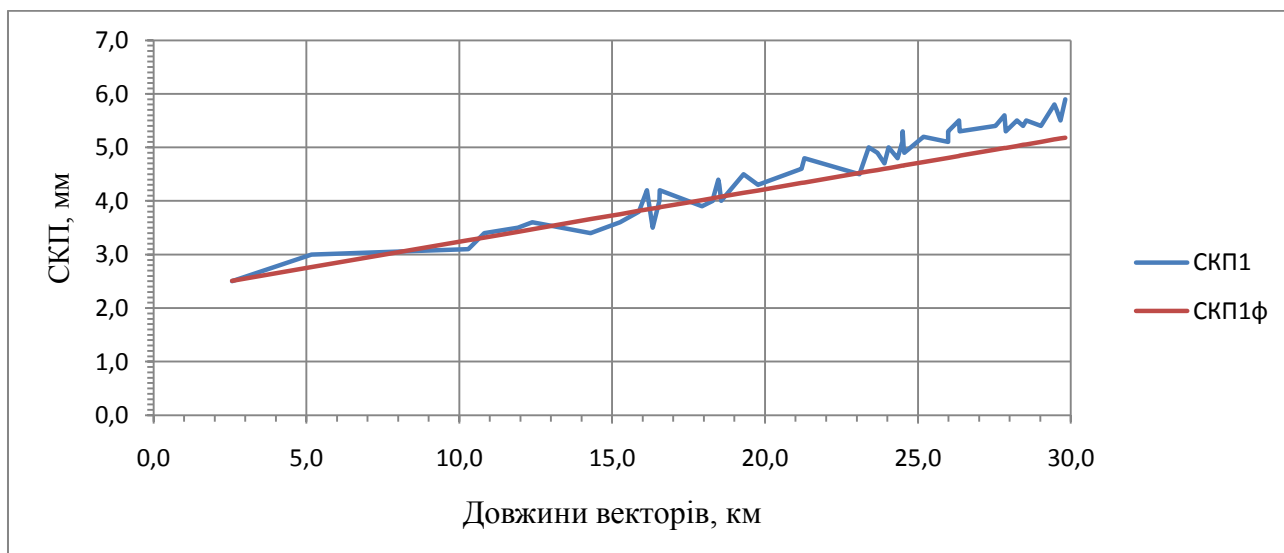
### 1. Сеанси тривалістю 24 години



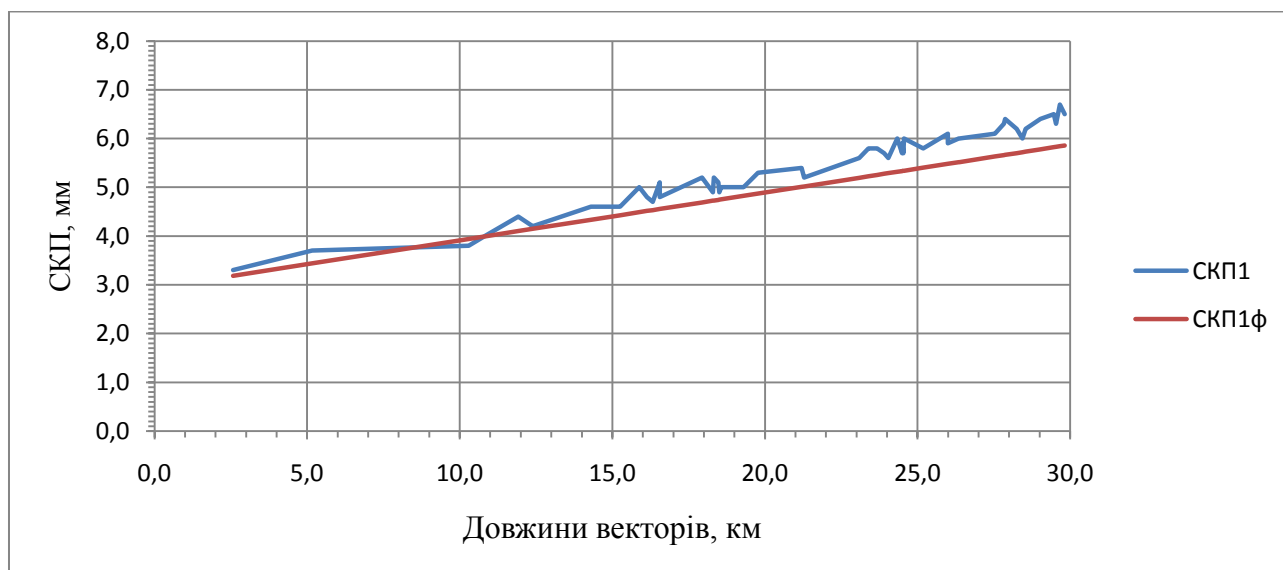
### 2. Сеанси тривалістю 12 годин



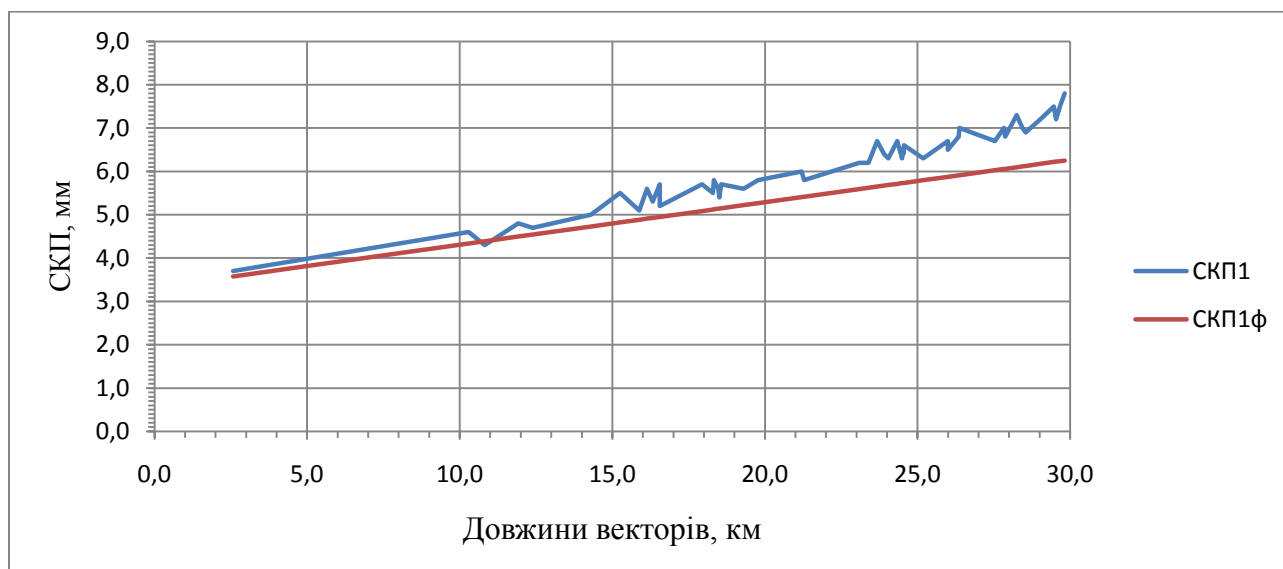
### 3. Сеанси тривалістю 6 годин



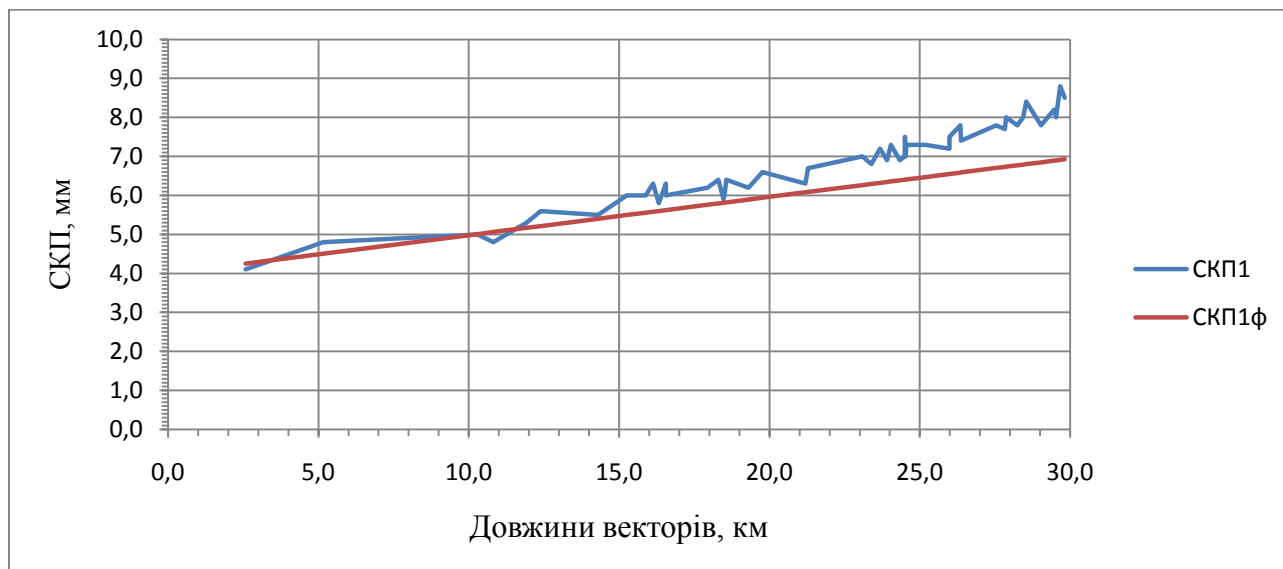
## 4. Сеанси тривалістю 3 години



## 5. Сеанси тривалістю 2 години



## 6. Сеанси тривалістю 1 година



## 7. Сеанси тривалістю 0,5 години

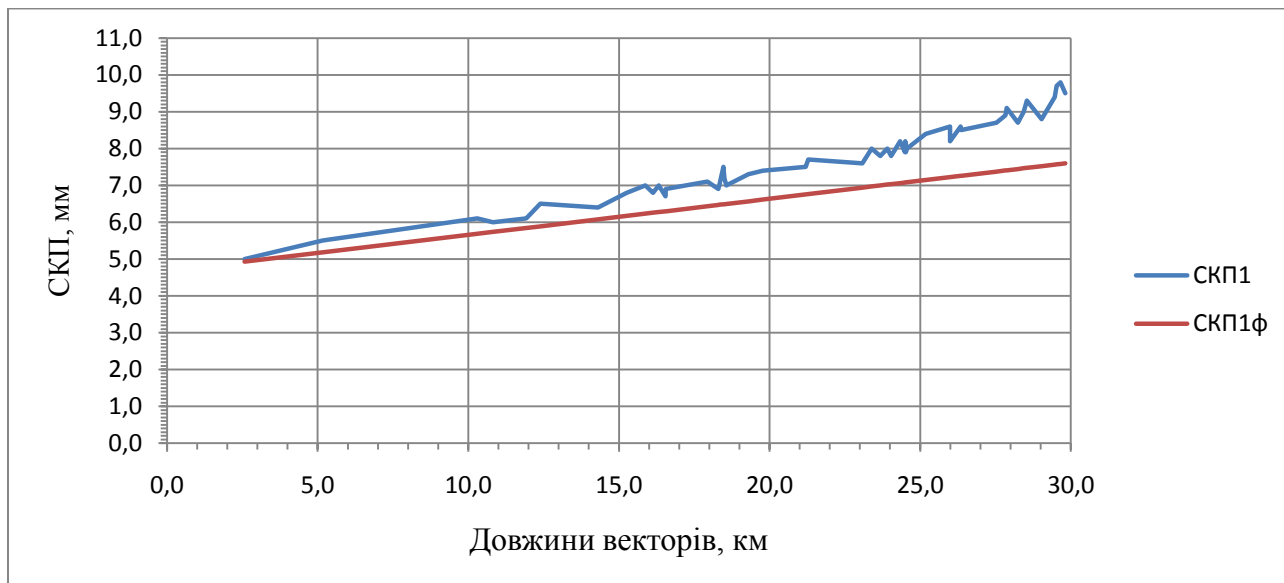
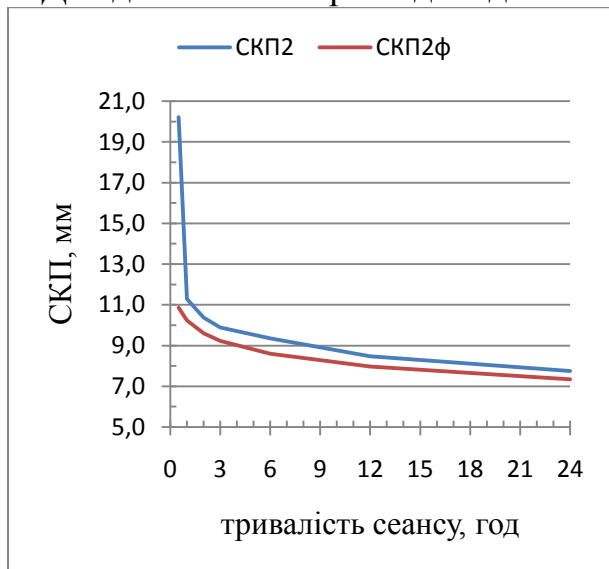
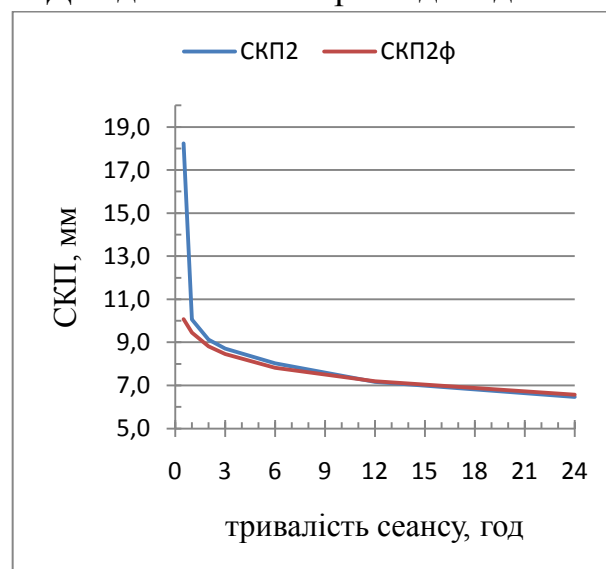


Рис. А.4. Графіки СКП довжини векторів, отриманих за результатами спостережень двосистемними одночастотними приймачами, при тривалості спостережень: 24, 12, 6, 3, 2, 1 та 0,5 години та віддаль між приймачами від 3 до 30 км

1. Для довжин векторів від 80 до 89 км

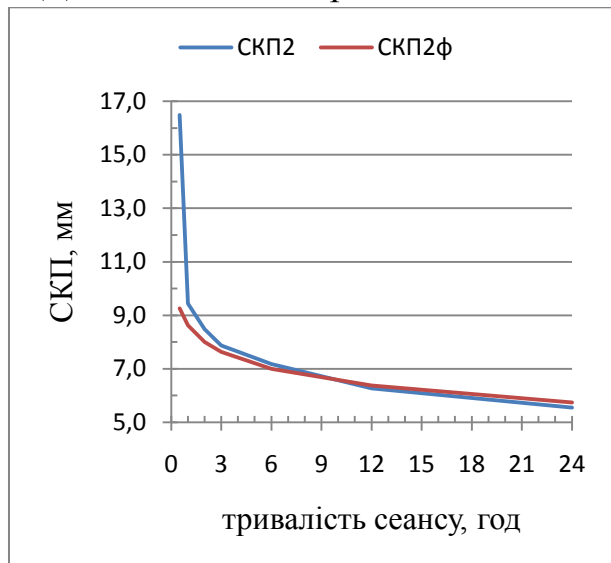


2. Для довжин векторів від 70 до 80 км

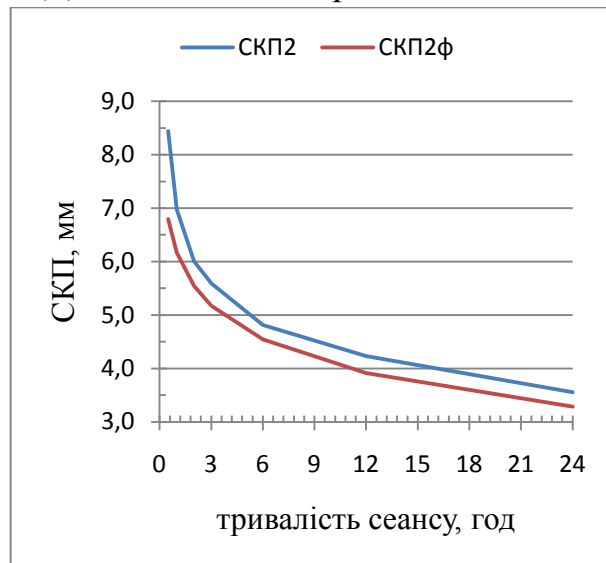




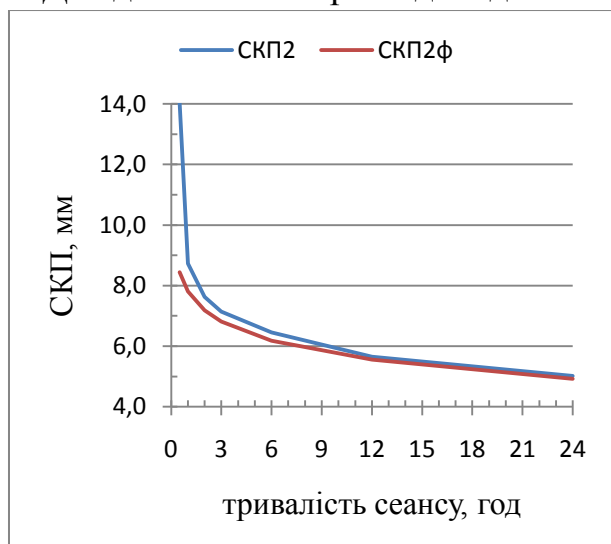
3. Для довжин векторів від 60 до 70 км



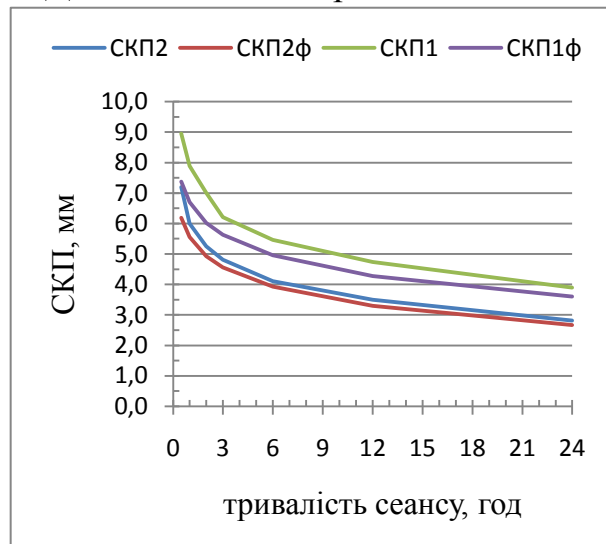
6. Для довжин векторів від 30 до 40 км



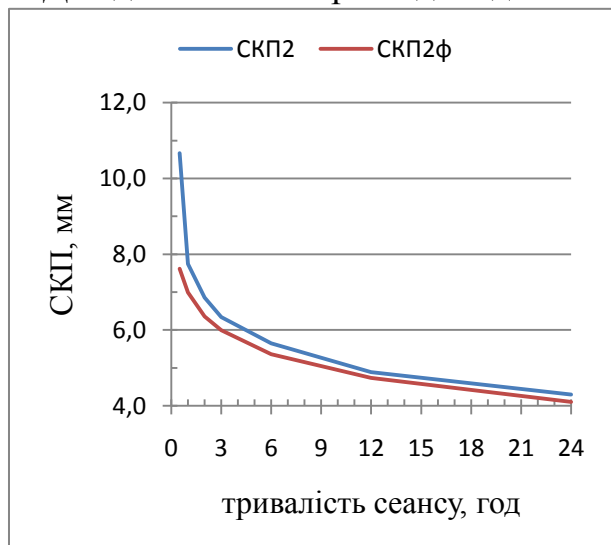
4. Для довжин векторів від 50 до 60 км



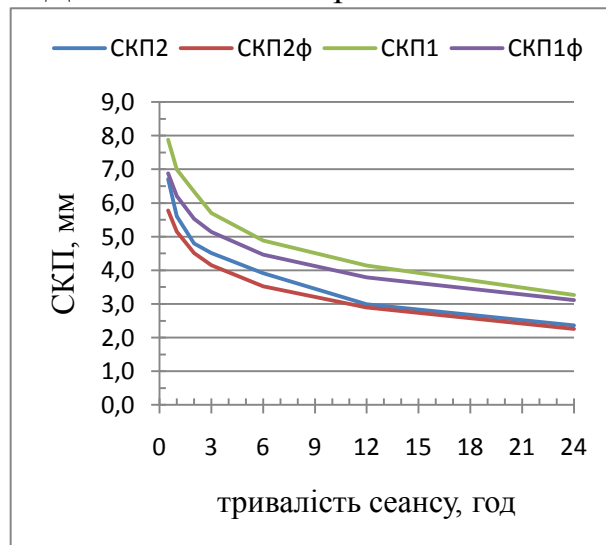
7. Для довжин векторів від 25 до 30 км



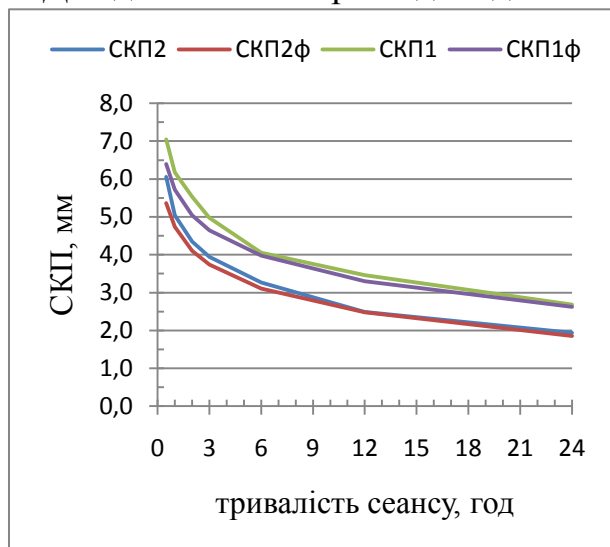
5. Для довжин векторів від 40 до 50 км



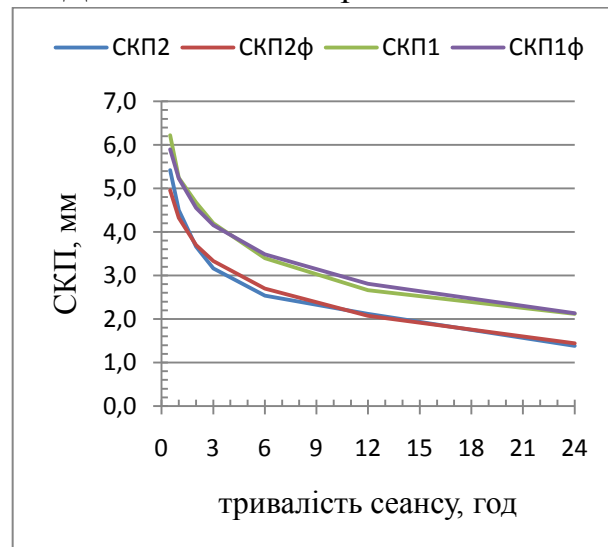
8. Для довжин векторів від 20 до 25 км



9. Для довжин векторів від 15 до 20 км



10. Для довжин векторів від 10 до 15 км



11. Для довжин векторів від 2 до 10 км

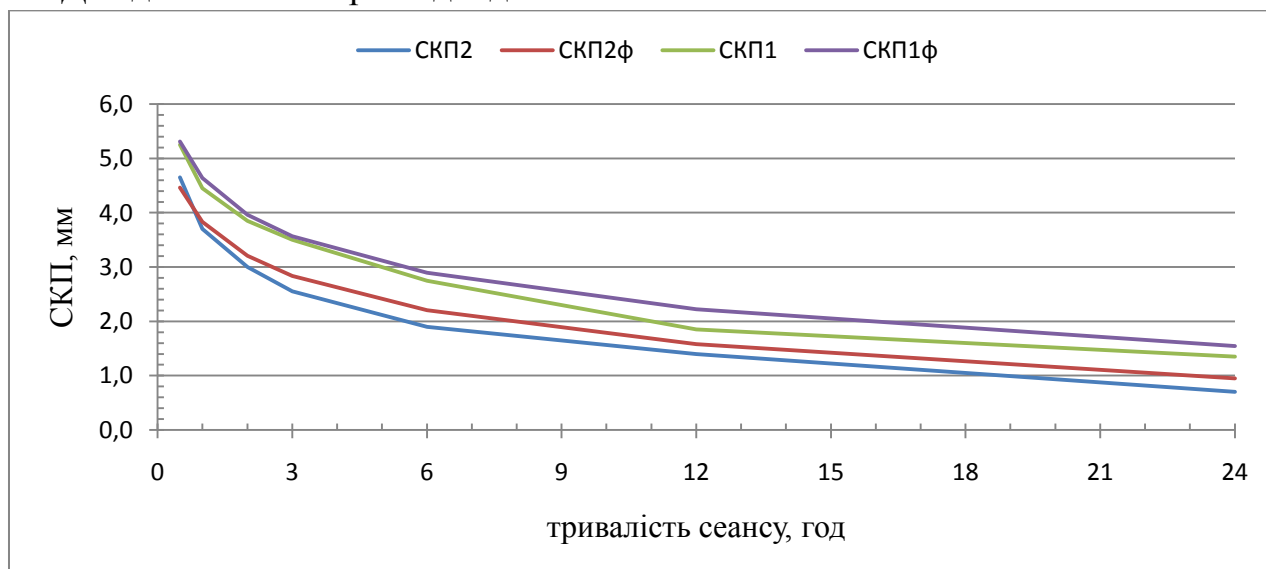


Рис. А.5. СКП довжини векторів, отриманих за результатами спостережень двосистемними двочастотними та двосистемними одночастотними приймачами, при тривалості спостережень: 24, 12 6, 3, 2, 1 та 0,5 години для векторів певного діапазону довжини

На графіках (рис. А.3, А.4, А.5) показані: СКП2 – середні квадратичні помилки довжин векторів визначені за результатами спостережень двочастотними приймачами; СКП2ф – СКП довжин векторів, значення яких обчислені за рівнянням регресії для двочастотних приймачів (2.8); СКП1 – СКП визначені за результатами спостережень одночастотними приймачами; СКП1ф – СКП визначені за рівнянням регресії для одночастотних приймачів (2.9).

## Додаток Б

Таблиця Б.1

Максимальні помилки (в міліметрах) положення пунктів мереж №1, 2, 3  
при різній тривалості сеансів\*

№ п/п	Назва пункту	Назва системи	Тривалість спостережень, год						
			24	12	6	3	2	1	0,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>мережа №1</b>									
1	СТ25	2 системи	1,1	2,3	3,2	6,1	6,1	8,6	10,6
		GPS	2,8	3,6	3,6	7,2	6,7	9,4	10,8
2	СТ30	2 системи	2,5	2,5	2,6	5,5	6,1	7,9	6,7
		GPS	1,6	2,6	3,5	6,7	6,5	10,8	7,9
3	СТ31	2 системи	2,4	2,3	2,9	5,5	6,5	5,7	9,7
		GPS	1,5	1,5	2,9	5,5	7,7	8,0	9,3
4	СТ34	2 системи	0,5	0,5	1,9	2,5	7,8	3,3	5,7
		GPS	0,5	0,5	1,9	3,3	4,3	3,6	6,0
5	СТ35	2 системи	1,1	1,4	4,2	5,6	16,4	5,9	10,3
		GPS	0,2	1,4	4,2	6,7	5,8	7,3	9,0
6	СТ38	2 системи	3,6	2,6	2,6	3,6	6,8	6,0	8,0
		GPS	3,4	2,3	3,6	3,6	4,0	7,9	14,3
7	СТ39	2 системи	0,4	1,9	1,9	1,9	5,2	3,2	5,5
		GPS	0,4	1,6	1,9	2,8	4,7	9,1	10,7
8	LENE	2 системи	2,1	3,4	6,2	6,2	9,3	3,4	7,2
		GPS	2,1	3,4	6,2	5,7	4,7	7,7	7,2
<b>мережа №2</b>									
1	СТ14	2 системи	0,0	1,0	1,4	2,8	3,2	5,0	12,0
		GPS	1,0	1,0	1,4	3,6	3,2	6,0	12,0
2	СТ15	2 системи	1,4	1,4	4,1	4,1	4,1	4,5	5,4
		GPS	1,0	1,0	4,1	4,1	4,1	3,6	6,1
3	СТ41	2 системи	1,4	2,0	3,2	4,5	5,1	5,0	5,4
		GPS	2,2	0,0	2,2	4,5	5,1	5,0	5,4
4	СТ60	2 системи	1,0	1,0	4,0	4,0	4,0	7,1	7,2
		GPS	1,0	2,0	4,0	5,1	4,0	7,1	6,7
5	СТ72	2 системи	1,0	2,2	4,0	4,5	3,6	3,6	6,3
		GPS	1,0	3,0	5,1	5,0	4,5	7,2	14,9
6	СТ83	2 системи	0,0	1,0	3,2	4,0	4,0	3,0	4,1
		GPS	1,0	1,0	4,1	4,1	3,2	3,2	4,1
7	СТZ1	2 системи	0,0	2,0	2,0	4,5	3,0	4,1	3,2
		GPS	0,0	2,0	2,2	4,1	3,2	3,6	3,6
<b>мережа №3</b>									
1	BRET	2 системи	1,4	1,0	2,0	2,2	2,2	5,4	4,1
		GPS	1,4	2,2	2,2	3,2	3,2	4,1	4,5
2	СТ 5A	2 системи	2,2	1,0	7,3	7,6	8,1	7,2	9,2
		GPS	2,2	2,0	5,1	6,7	7,2	7,8	9,4
3	СТ53	2 системи	2,2	5,4	2,2	3,2	3,2	8,1	8,1
		GPS	2,0	4,5	4,2	4,5	3,2	9,1	9,0

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	СТ54	2 системи	1,0	1,0	1,0	3,2	3,0	7,3	8,1
		GPS	1,4	2,2	2,0	3,0	3,2	9,5	9,1
5	MELN	2 системи	1,0	3,2	3,2	3,6	4,2	5,4	8,1
		GPS	1,0	2,2	2,2	3,2	2,8	6,1	7,0
6	MLVL	2 системи	1,4	1,4	2,8	4,1	5,0	5,4	9,1
		GPS	1,0	1,4	2,2	2,2	4,5	6,3	9,1
7	SIRT	2 системи	1,0	1,0	2,0	4,0	6,0	7,6	9,5
		GPS	1,4	2,0	3,0	5,1	6,1	8,6	10,0

Таблиця Б.2

Максимальні помилки (в міліметрах) положення пунктів мережі №4 при різній тривалості сеансів\*

№ п/п	Назва пункту	Назва системи	Тривалість спостережень, год							
			24	12	6	3	2	1	0,5	0,25
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>мережа №4(швейцарія)</b>										
1	AND2	2 системи	4,5	6,4	7,8	7,8	14,9	12,2	18,6	4,5
		GPS	3,6	5,7	8,1	7,6	8,2	23,0	90,2	3,6
2	DAV2	2 системи	8,0	14,0	14,9	16,5	17,0	14,0	10,3	8,0
		GPS	7,0	15,1	15,3	16,0	18,0	17,0	72,7	7,0
3	ETH2	2 системи	7,0	6,0	10,2	12,6	13,3	15,8	13,9	7,0
		GPS	7,0	6,0	12,2	12,6	14,6	38,6	81,0	7,0
4	FALE	2 системи	4,5	9,8	13,6	18,9	27,3	27,0	18,4	4,5
		GPS	5,0	12,1	17,0	24,2	30,4	29,8	96,2	5,0
5	FHBB	2 системи	2,0	2,2	4,1	7,0	9,1	6,1	9,5	2,0
		GPS	2,2	1,4	4,1	5,1	11,0	22,1	73,8	2,2
6	FRI3	2 системи	4,5	6,4	6,4	7,8	7,2	6,7	18,1	4,5
		GPS	3,6	5,7	6,4	7,2	11,0	34,5	73,6	3,6
7	HABG	2 системи	4,1	5,1	8,1	8,1	12,7	23,3	17,5	4,1
		GPS	4,5	5,7	6,4	7,8	17,7	68,2	24,2	4,5
8	HUTT	2 системи	4,2	7,2	9,4	9,2	11,7	13,3	12,0	4,2
		GPS	4,2	7,2	8,6	9,0	11,7	38,9	75,6	4,2
9	KALT	2 системи	4,5	6,3	8,0	8,1	6,1	11,2	13,0	4,5
		GPS	5,0	6,3	8,1	7,1	6,7	8,1	21,9	5,0
10	LUZE	2 системи	7,6	8,0	12,2	12,6	19,6	28,4	28,0	7,6
		GPS	6,3	8,0	12,2	13,9	21,2	68,6	87,1	6,3
11	NEUC	2 системи	4,5	7,2	12,1	13,0	13,0	23,7	26,1	4,5
		GPS	4,5	7,2	13,9	14,9	13,4	23,7	25,0	4,5
12	PAYE	2 системи	3,2	1,4	2,8	4,1	6,7	10,6	10,8	3,2
		GPS	3,2	1,4	3,2	6,1	6,4	11,4	15,7	3,2
13	SAA2	2 системи	7,3	11,0	12,6	12,2	22,5	17,3	14,6	7,3
		GPS	8,2	11,0	11,7	11,7	23,4	25,7	27,1	8,2
14	SANB	2 системи	7,1	8,1	8,1	11,2	13,6	17,9	21,6	7,1
		GPS	7,3	7,1	8,1	10,8	17,7	18,0	84,0	7,3

## Продовження таблиці Б.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
15	SAR2	2 системи	5,0	3,6	8,9	10,2	14,1	19,2	18,2	5,0
		GPS	5,1	3,6	8,5	11,0	14,9	14,6	69,9	5,1
16	SCHA	2 системи	5,0	5,1	8,2	10,8	6,4	6,4	6,7	5,0
		GPS	5,0	6,4	10,3	12,5	6,0	34,9	69,0	5,0
17	STCX	2 системи	8,9	10,3	12,5	9,8	15,8	17,7	17,2	8,9
		GPS	7,3	10,3	13,0	9,8	16,4	18,4	134,7	7,3
18	STGA	2 системи	9,1	9,2	12,2	14,3	17,7	18,4	20,1	9,1
		GPS	9,1	8,2	11,2	14,3	16,1	10,2	83,7	9,1
19	ZIM2	2 системи	9,1	11,0	12,0	10,0	11,2	14,2	12,7	9,1
		GPS	8,1	10,0	13,2	11,4	13,5	24,6	86,2	8,1

\* - Для тривалості 24 години у табл. В.1 та В.2 наведені значення помилок для кожного пункту в мережах.

## Таблиця Б.3

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
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Двочастотні приймачі</b>								
<b>Система GPS</b>								
<b>Мережа №1</b>								
24	сер	6,2	6,2	6,2	6,5	6,1	7,6	7,4
	Δ	7,8-1,6	7,9-1,6	7,8-1,6	8,5-1,3	7,9-1,7	11,7-3,2	12,2-1,6
12	сер	7,1	7,2	6,8	7,2	7,2	6,8	7,1
	Δ	10,1-1,7	10,3-1,8	9,8-1,7	10,0-1,7	9,6-1,9	9,5-1,5	11,9-1,8
6	сер	8,0	8,0	8,1	7,8	7,5	7,6	8,3
	Δ	10,7-1,9	10,6-1,9	11,1-1,9	10,3-1,7	10,0-1,8	10,1-1,8	13,3-2,1
3	сер	8,6	8,6	8,6	8,6	8,3	9,7	10,9
	Δ	11,6-2,2	11,6-2,1	11,6-2,2	11,6-2,2	11,4-1,9	12,3-4,7	15,3-7,3
2	сер	9,3	9,3	9,4	9,2	8,9	9,5	12,8
	Δ	13,0-2,3	13,0-2,3	13,0-2,4	12,9-2,3	12,8-2,3	15,6-2,2	18,9-4,3
1	сер	9,4	9,4	9,5	9,3	9,4	9,0	48,8
	Δ	12,6-4,5	12,7-4,5	13,1-4,5	13,4-2,5	13,4-3,0	11,9-2,7	68,2-39,7
0,5	сер	10,5	10,9	10,5	10,3	10,0	12,0	150,0
	Δ	14,9-3,6	14,3-3,4	14,8-3,6	14,5-2,8	14,8-2,6	17,3-5,1	215,2-58,4
0,25	сер	14,4	14,5	14,4	11,1	10,5	14,0	164,2
	Δ	16,9-11,4	16,9-11,5	16,9-11,4	14,2-6,1	13,7-4,8	20,5-8,2	265,4-102,6

## Продовження таблиці Б.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Мережа №2</b>								
24	сер	5,8	5,8	5,8	5,7	5,6	5,9	6,0
	Δ	10,1-2,5	10,1-2,5	10,1-2,5	9,8-2,5	9,7-2,3	10,4-2,7	10,2-2,8
12	сер	6,5	6,5	6,5	6,3	6,2	5,9	6,1
	Δ	11,0-3,2	10,9-3,1	11,0-3,2	10,3-3,4	10,0-3,5	9,4-3,1	11,4-2,4
6	сер	7,0	7,0	7,0	6,9	6,8	6,5	7,8
	Δ	9,9-4,5	9,9-4,5	9,9-4,5	9,9-4,6	9,8-4,5	9,4-4,1	11,0-5,1
3	сер	7,4	7,4	7,4	7,4	7,3	7,3	10,6
	Δ	10,8-4,8	10,7-4,9	10,8-4,9	10,7-4,8	10,5-5,0	10,9-4,9	14,8-6,9
2	сер	7,8	7,8	7,8	7,6	7,6	7,9	13,5
	Δ	11,0-5,3	11,0-5,3	11,0-5,3	10,8-5,1	10,9-5,0	10,8-5,2	20,0-8,7
1	сер	8,2	8,2	8,2	8,2	7,9	8,1	33,7
	Δ	10,4-4,4	10,6-4,4	10,4-4,4	11,0-5,3	10,8-5,2	10,8-5,4	160,0-15,8
0,5	сер	9,4	9,4	9,4	9,3	9,2	17,6	145,1
	Δ	11,6-5,6	11,6-5,6	11,5-5,6	11,1-6,3	11,0-7,2	89,7-9,0	355,6-80,7
0,25	сер	13,1	13,3	13,1	12,9	14,1	36,7	204,0
	Δ	17,2-10,3	17,1-10,6	17,2-10,3	20,8-8,0	24,7-9,0	258,4-10,4	601,3-121,8
<b>Мережа №3</b>								
24	сер	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,3	4,7
	Δ	9,1-1,0	9,0-1,0	9,2-1,0	9,5-1,0	9,3-1,0	8,6-1,1	8,0-0,8
12	сер	5,9	5,9	5,9	5,9	5,6	5,0	11,0
	Δ	10,3-1,7	10,3-1,7	10,3-1,7	10,5-1,6	10,2-1,4	9,6-1,1	14,8-7,2
6	сер	6,2	6,2	6,2	6,1	5,9	5,3	14,1
	Δ	10,8-1,6	10,7-1,6	10,8-1,6	10,6-1,6	10,1-1,6	9,2-1,0	17,8-9,6
3	сер	6,6	6,5	6,6	6,7	6,4	6,0	7,0
	Δ	10,5-1,7	10,5-1,6	10,6-1,7	10,6-1,6	10,2-1,5	9,6-1,4	9,1-2,9
2	сер	7,2	6,8	7,2	7,1	7,1	6,6	19,2
	Δ	11,2-1,9	10,7-1,8	11,2-1,9	11,2-1,7	11,3-1,6	10,6-1,4	37,3-7,1
1	сер	7,1	7,2	7,1	6,8	6,8	6,6	19,9
	Δ	10,9-1,4	10,9-1,5	10,9-1,4	10,8-1,4	11,0-1,9	10,5-1,5	33,9-11,5
0,5	сер	8,3	8,3	8,3	7,3	7,0	10,1	125,1
	Δ	10,9-3,5	10,9-3,5	10,9-3,5	9,8-1,5	9,6-1,3	12,6-7,3	224,4-82,1
0,25	сер	18,6	18,5	18,6	9,2	9,6	9,4	153,6
	Δ	52,2-10,6	52,2-10,4	52,2-10,6	12,9-1,5	12,0-3,1	12,8-2,6	252,2-52,5
<b>Системи GPS + ГЛОНАСС</b>								
<b>Мережа №1</b>								
24	сер	6,2	6,3	6,3	6,2	6,7	6,6	6,1
	Δ	8,2-1,5	8,2-1,7	8,2-1,6	8,1-1,6	8,9-2,4	8,7-1,7	9,2-1,2
12	сер	7,4	7,4	7,4	7,3	7,2	7,4	6,6
	Δ	9,8-2,0	9,5-2,0	9,8-2,0	10,0-1,7	9,7-2,0	10,0-1,8	8,8-1,5
6	сер	7,9	7,9	7,9	7,8	7,5	7,3	7,5
	Δ	10,5-2,1	10,6-2,1	10,5-2,1	10,5-2,1	9,9-1,8	9,7-1,9	10,3-2,1
3	сер	8,4	8,4	8,4	8,2	8,0	8,0	8,4
	Δ	11,3-2,1	11,3-2,1	11,3-2,1	10,7-2,0	10,6-1,9	10,4-2,3	11,3-3,6
2	сер	8,9	8,9	8,9	8,8	8,7	8,5	9,0
	Δ	12,2-2,3	12,3-2,3	12,2-2,3	12,1-2,3	12,0-2,4	11,6-2,3	12,3-4,7
1	сер	9,0	9,0	9,0	8,8	8,8	9,0	11,2
	Δ	12,1-2,9	12,3-2,9	12,1-2,9	12,0-2,2	12,3-2,2	12,0-2,4	13,7-7,2

## Продовження таблиці Б.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	сер	9,2	9,4	9,3	9,4	9,3	10,9	15,1
	Δ	13,5-2,0	13,4-2,0	13,5-2,0	13,3-2,1	13,6-2,7	20,1-3,7	23,8-9,3
0,25	сер	11,9	11,9	11,9	9,4	9,5	15,0	86,5
	Δ	13,8-7,7	13,7-7,7	13,8-7,7	11,9-2,0	13,0-2,6	17,9-9,7	173,4-51,4
<b>Мережа №2</b>								
24	сер	6,0	6,1	6,1	6,0	6,0	6,1	5,9
	Δ	10,3-2,3	10,3-2,1	10,3-2,3	9,6-2,9	10,1-2,3	10,8-2,7	10,7-2,3
12	сер	6,6	6,6	6,6	6,4	6,4	6,4	6,1
	Δ	11,3-3,4	11,3-3,4	11,3-3,4	11,5-3,3	10,9-3,2	10,2-3,6	10,8-3,5
6	сер	7,2	7,2	7,2	6,9	6,9	6,6	6,7
	Δ	11,0-4,2	10,9-4,2	10,9-4,2	10,6-4,5	10,4-4,2	9,7-4,1	11,0-3,9
3	сер	7,5	7,5	7,5	7,4	7,3	7,3	7,3
	Δ	11,4-4,4	11,4-4,4	11,3-4,5	11,3-4,7	11,0-4,6	10,9-4,4	12,4-4,9
2	сер	7,7	7,7	7,7	7,6	7,5	7,4	7,9
	Δ	11,3-4,8	11,4-5,0	11,3-4,9	11,4-4,8	10,9-4,8	10,7-4,6	12,5-5,3
1	сер	8,3	8,3	8,3	8,0	8,2	7,6	9,5
	Δ	10,3-5,6	10,3-5,5	10,3-5,6	10,6-5,0	10,7-5,4	10,3-4,7	13,2-7,1
0,5	сер	9,1	9,1	9,2	8,8	8,6	9,3	14,2
	Δ	12,3-5,9	12,4-5,9	11,8-5,8	11,1-5,6	10,8-6,2	11,9-6,0	19,3-8,6
0,25	сер	10,1	10,1	10,1	9,0	9,0	10,9	45,0
	Δ	16,3-6,9	16,3-7,2	16,3-6,9	11,3-6,5	11,3-6,2	18,9-6,9	74,0-27,3
<b>Мережа №3</b>								
24	сер	4,4	4,4	4,4	4,4	4,5	4,8	4,8
	Δ	7,6-1,0	7,4-1,0	7,6-1,0	7,8-1,0	7,6-1,0	8,3-1,2	7,7-1,3
12	сер	5,8	5,8	5,8	5,9	5,5	5,2	5,5
	Δ	9,4-1,7	9,4-1,7	9,4-1,7	9,8-1,7	9,0-1,6	9,6-1,2	9,5-1,4
6	сер	6,0	6,0	6,0	6,2	5,9	5,3	5,6
	Δ	9,6-1,5	9,6-1,5	9,6-1,5	9,8-2,6	9,1-2,7	8,7-1,2	9,3-1,3
3	сер	6,5	6,5	6,5	6,4	6,9	5,7	5,9
	Δ	9,6-1,8	9,7-1,7	9,6-1,8	9,7-1,6	10,1-1,5	8,9-1,3	9,5-1,5
2	сер	6,9	6,9	6,9	6,7	6,6	6,3	6,4
	Δ	10,3-1,8	10,3-1,8	10,3-1,8	10,3-1,7	10,1-1,6	9,6-1,5	10,1-1,4
1	сер	7,3	7,4	7,3	7,1	6,8	6,6	10,2
	Δ	10,7-1,7	10,7-1,7	10,7-1,7	10,6-1,4	10,0-1,6	9,7-1,5	14,3-6,5
0,5	сер	8,5	8,5	8,6	7,0	6,7	8,4	14,8
	Δ	10,3-4,6	10,4-4,6	10,3-4,6	9,1-1,4	9,2-1,2	13,9-4,2	21,4-8,8
0,25	сер	14,0	14,1	14,0	8,4	8,6	8,4	66,6
	Δ	45,0-5,8	45,0-6,1	45,0-5,8	11,8-1,7	11,0-2,6	11,5-1,4	88,7-56,2
<b>Одночастотні приймачі</b>								
<b>Система GPS</b>								
<b>Мережа №1</b>								
24	сер	16,1	16,2	16,1	16,9	15,2	16,5	16,6
	Δ	24,4-1,7	24,7-1,7	24,5-1,7	29,3-1,8	24,6-0,9	29,1-1,9	27,2-3,8
12	сер	16,2	16,3	16,2	15,8	15,5	15,0	23,8
	Δ	25,9-1,6	26,2-1,6	25,9-1,6	25,4-1,0	26,7-0,6	22,0-3,3	41,5-2,9
6	сер	17,6	17,7	17,6	17,4	15,7	17,2	31,3
	Δ	30,3-0,8	30,3-0,8	30,3-0,8	30,0-0,8	27,4-0,6	28,9-2,6	59,0-3,5
3	сер	20,0	20,1	20,1	19,7	19,1	17,7	24,4
	Δ	31,3-1,4	31,3-1,4	31,1-1,5	31,3-2,1	30,3-1,5	27,6-2,4	37,6-8,0

## Продовження таблиці Б.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	сер	21,2	21,3	21,2	20,8	20,4	20,5	47,0
	Δ	32,2-2,3	32,4-2,4	32,3-2,3	31,7-3,0	31,2-2,4	29,8-3,5	110,5-16,4
1	сер	22,8	22,8	22,8	23,1	22,5	42,6	258,3
	Δ	34,2-8,9	34,3-8,9	34,2-8,9	34,3-9,4	34,2-6,9	67,6-8,8	358,4-170,7
0,5	сер	29,7	29,7	29,7	32,9	48,6	69,6	242,1
	Δ	36,9-15,3	36,8-15,3	36,9-15,3	43,4-19,0	81,1-28,2	116,0-18,4	378,1-71,7
0,25	сер	38,1	38,2	38,1	53,0	69,4	111,7	239,8
	Δ	45,7-21,1	45,6-21,0	45,7-21,2	71,1-19,5	112,2-19,6	151,7-64,5	363,2-84,9
<b>Мережа №2</b>								
24	сер	31,4	16,0	16,2	15,9	15,6	12,9	10,9
	Δ	55,2-3,7	29,3-3,0	29,8-3,0	26,1-2,4	26,0-3,0	23,8-1,5	18,3-2,2
12	сер	18,8	18,9	18,8	17,9	17,5	17,3	19,2
	Δ	37,6-3,6	37,6-3,6	37,2-3,6	34,8-4,2	35,5-4,3	26,5-3,2	39,6-2,9
6	сер	19,8	19,8	19,8	19,1	18,2	19,1	28,9
	Δ	37,1-2,6	37,1-2,6	37,1-2,6	35,6-2,5	34,3-2,5	33,9-2,5	56,0-7,2
3	сер	22,7	22,8	22,8	22,4	21,6	21,0	32,8
	Δ	39,5-1,5	40,0-1,7	40,1-1,7	39,1-1,7	37,8-1,3	39,3-5,3	43,5-15,3
2	сер	24,0	23,9	24,0	23,8	23,4	28,3	69,6
	Δ	39,0-2,1	39,0-1,9	39,0-2,1	38,1-2,5	36,9-2,2	44,9-13,6	122,7-25,2
1	сер	25,3	25,3	25,3	24,1	23,2	57,7	170,1
	Δ	46,2-6,0	46,1-6,0	46,2-6,0	46,6-4,1	44,8-3,9	195,7-22,6	287,6-61,3
0,5	сер	29,3	29,3	29,3	28,9	38,4	64,7	289,6
	Δ	59,4-10,4	59,3-10,3	59,4-10,4	55,3-8,5	81,6-17,3	139,1-24,8	411,3-60,6
0,25	сер	56,8	56,8	56,8	55,4	64,3	89,0	277,1
	Δ	153,6-28,2	153,6-28,2	153,6-28,2	107,2-29,1	143,0-35,4	189,0-20,3	481,4-75,2
<b>Мережа №3</b>								
24	сер	17,8	17,8	17,9	16,5	15,3	11,2	15,7
	Δ	32,2-0,5	32,4-0,4	32,3-0,4	28,5-0,6	25,6-0	19,8-1,0	28,8-2,3
12	сер	18,4	18,3	18,4	18,2	16,0	11,7	23,5
	Δ	35,0-0,6	34,5-0,6	35,0-0,6	35,0-0,0	31,1-0,0	23,9-1,0	47,1-2,2
6	сер	18,5	18,5	18,5	17,0	17,8	15,1	27,2
	Δ	33,2-0,5	33,3-0,4	33,3-0,4	29,8-0,3	31,5-0,3	27,3-1,8	53,8-6,5
3	сер	20,4	20,5	20,5	19,9	19,5	17,5	21,4
	Δ	36,6-1,2	36,6-1,2	36,6-1,2	35,3-1,7	33,8-1,5	29,8-1,2	33,7-2,4
2	сер	21,3	21,3	21,3	21,1	20,6	19,8	114,4
	Δ	38,2-1,4	37,8-2,0	37,8-2,0	37,2-2,5	35,2-2,8	33,1-1,9	137,8-69,5
1	сер	21,9	21,9	21,9	21,1	20,1	76,2	258,9
	Δ	37,5-5,8	37,6-5,9	37,6-5,9	35,4-5,2	34,5-4,3	132,3-36,6	353,1-179,8
0,5	сер	23,8	23,8	23,8	29,6	32,5	39,2	174,8
	Δ	38,4-8,5	38,5-8,6	38,5-8,6	41,2-13,6	40,1-20,1	50,5-24,2	266,1-74,9
0,25	сер	65,3	66,3	65,3	62,4	92,6	98,4	165,2
	Δ	87,4-43,6	89,1-44,4	87,3-43,7	81,9-42,7	138,5-52,4	136,2-73,8	244,3-81,8
<b>Системи GPS + ГЛОНАСС</b>								
<b>Мережа №1</b>								
24	сер	15,2	15,2	15,2	16,1	15,8	15,1	10,1
	Δ	24,6-2,1	24,2-1,9	24,6-2,1	25,7-2,5	26,5-0,8	25,3-1,6	14,0-1,5
12	сер	18,0	17,9	18,0	19,1	16,6	16,1	15,2



## Продовження таблиці Б.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Δ	28,2-1,0	27,5-1,0	28,2-1,0	30,7-1,8	28,0-1,7	25,5-2,6	22,3-3,6
6	сер	19,4	19,4	19,4	20,8	16,8	16,4	15,7
	Δ	28,6-2,3	28,7-2,3	28,6-2,3	34,6-2,6	26,4-2,2	24,3-0,8	25,7-3,7
3	сер	20,3	20,4	20,3	19,1	18,1	16,4	16,3
	Δ	32,4-2,2	32,2-2,0	32,4-2,2	29,1-1,7	28,0-1,4	24,7-1,4	23,4-2,7
2	сер	21,2	21,3	21,2	19,9	19,1	17,4	18,6
	Δ	33,9-2,6	33,5-2,7	33,8-2,6	30,8-1,9	29,4-2,0	26,2-1,8	28,1-4,1
1	сер	21,5	21,6	21,5	21,3	18,5	18,9	37,7
	Δ	33,1-5,9	33,1-6,0	33,1-5,9	32,6-5,3	26,9-5,1	27,2-4,7	64,5-14,8
0,5	сер	23,5	23,6	23,5	23,7	25,8	35,3	172,1
	Δ	32,0-11,6	32,1-11,6	32,0-11,6	32,5-10,8	31,9-15,7	63,6-18,8	224,9-76,9
0,25	сер	28,3	31,9	28,3	32,7	49,5	89,2	158,3
	Δ	37,8-19,6	63,5-20,1	37,8-19,5	45,7-22,8	91,4-23,6	168,3-50,7	323,5-56,8
<b>Мережа №2</b>								
24	сер	15,0	14,8	14,9	15,8	15,8	14,6	11,1
	Δ	28,3-2,7	27,7-2,6	28,2-2,7	29,7-1,4	30,8-1,9	25,8-1,6	22,0-1,7
12	сер	17,9	17,7	17,9	18,3	20,4	17,2	15,0
	Δ	35,3-4,3	35,6-4,3	35,3-4,3	37,2-2,2	39,0-1,7	28,7-2,1	30,5-1,4
6	сер	20,6	20,4	20,6	21,8	18,8	15,5	18,0
	Δ	39,0-3,2	38,8-3,1	39,0-3,2	41,3-2,0	38,3-1,3	30,1-2,3	33,9-3,9
3	сер	22,1	21,8	22,1	21,4	19,0	17,9	18,6
	Δ	40,4-2,2	40,2-1,8	40,4-2,1	39,2-2,1	36,0-1,0	33,2-0,8	33,9-3,8
2	сер	21,1	21,1	21,1	20,4	19,9	19,4	19,3
	Δ	38,3-2,7	38,3-2,7	38,3-2,8	38,1-1,5	36,4-1,4	32,9-0,8	35,1-1,5
1	сер	21,5	21,6	21,5	21,4	20,2	18,8	34,0
	Δ	42,2-6,0	42,2-6,0	42,2-6,0	41,4-4,7	38,8-4,1	32,5-5,1	77,0-6,9
0,5	сер	22,5	22,5	22,5	21,7	20,2	24,6	555,1
	Δ	44,1-6,0	44,1-6,0	44,1-6,0	43,0-4,5	39,7-4,2	43,0-9,9	742,3-310,2
0,25	сер	27,6	27,7	27,6	23,0	33,9	31,5	157,8
	Δ	40,3-20,2	40,3-20,5	40,3-20,2	42,2-8,4	117,6-12,9	95,8-10,8	300,1-78,8
<b>Мережа №3</b>								
24	сер	15,5	15,4	15,5	16,6	18,4	13,6	10,8
	Δ	26,8-0,9	26,6-0,8	26,8-0,9	28,2-1,2	27,9-1,0	23,9-0,4	20,9-1,5
12	сер	18,9	18,8	18,9	18,9	17,2	14,6	15,7
	Δ	34,4-2,0	34,3-1,9	34,4-2,0	27,7-1,6	31,5-0,0	25,2-0,6	33,4-2,7
6	сер	19,7	19,5	19,7	18,5	18,2	14,9	19,3
	Δ	34,3-2,7	34,3-2,2	34,3-2,3	33,4-2,0	33,1-1,0	27,2-0,6	41,2-3,9
3	сер	21,3	21,2	21,2	19,9	18,6	15,8	16,8
	Δ	38,9-1,5	39,0-1,6	38,9-1,5	36,5-1,1	33,8-0,8	28,9-0,2	33,9-1,4
2	сер	21,3	21,3	21,3	20,6	19,5	16,6	19,0
	Δ	39,2-2,1	39,2-2,0	39,2-2,1	37,9-1,3	36,3-1,0	30,6-0,5	39,7-1,1
1	сер	21,1	21,1	21,1	22,1	19,6	16,8	39,0
	Δ	39,3-2,1	39,3-2,7	39,3-2,1	40,3-2,6	35,9-3,0	31,3-1,6	82,1-19,9
0,5	сер	22,0	22,2	22,0	20,1	19,6	19,0	234,3
	Δ	37,7-5,6	38,0-6,0	37,8-5,6	35,9-3,6	35,2-3,2	31,5-7,5	383,5-136,5
0,25	сер	27,2	27,3	27,2	23,3	24,1	35,1	119,4
	Δ	41,3-15,7	42,1-15,8	41,3-15,7	36,7-14,1	32,7-17,9	51,4-22,2	162,3-64,8

Таблиця Б.4

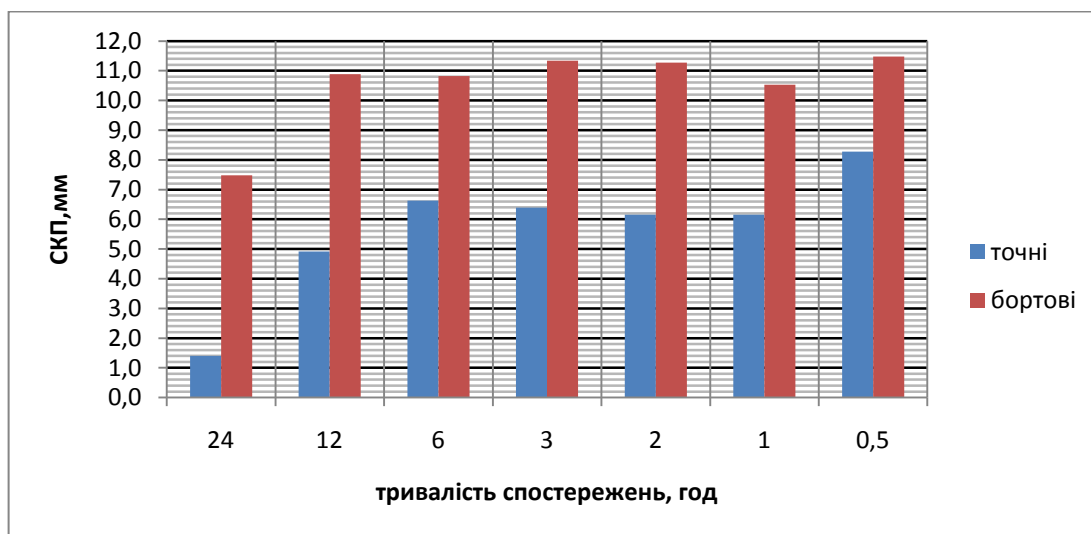
Середні квадратичні помилки положення пунктів в мм, визначені при різній тривалості сеансів та використанні остаточних і бортових ефемерид

№ п/п	Тип ефемерид	Назва пункту	Тривалість спостережень, год						
			24	12	6	3	2	1	0,5
мережа №1									
1	точні	СТ11	2,0	6,4	6,5	7,4	7,1	7,5	7,4
	бортові		6,5	12,8	12,8	14,3	13,4	11,0	13,7
2	точні	СТ13	1,4	6,0	6,6	7,5	7,3	6,9	8,3
	бортові		7,0	10,0	11,5	11,1	10,8	9,5	9,4
3	точні	СТ14	1,0	3,0	4,0	3,8	3,6	2,9	8,4
	бортові		6,1	7,3	7,3	6,4	7,0	6,6	11,5
4	точні	СТ16	1,4	1,4	2,1	1,8	1,9	2,8	2,9
	бортові		4,1	4,0	2,7	2,5	2,6	3,5	4,3
5	точні	СТ17	1,0	4,2	5,0	7,3	7,4	7,0	8,9
	бортові		11,0	18,4	18,3	18,0	18,5	18,6	13,3
6	точні	СТ18	1,4	5,1	8,5	5,9	6,4	5,6	8,2
	бортові		9,1	13,1	12,7	13,5	13,8	13,3	11,1
7	точні	СТ41	1,0	3,2	5,2	7,3	6,8	10,6	11,4
	бортові		9,2	15,0	15,2	16,5	15,9	16,1	13,7
8	точні	СТ43	1,4	5,0	5,2	5,4	4,7	5,5	9,0
	бортові		7,0	8,2	7,3	9,2	8,8	8,4	11,3
9	точні	СТ70	1,4	6,0	8,6	6,0	6,0	4,4	5,5
	бортові		7,0	8,2	7,3	9,2	8,8	8,4	11,3
10	точні	СТ73	1,4	6,1	10,7	7,4	7,0	4,0	7,8
	бортові		10,2	10,8	9,8	8,8	10,2	6,6	13,2
11	точні	СТ80	1,4	8,1	12,2	11,2	10,1	10,8	13,2
	бортові		6,3	11,0	13,9	14,8	14,2	14,1	15,1
12	точні	СТ81	2,0	4,5	5,0	5,7	5,5	5,8	8,3
	бортові		6,2	11,8	11,0	11,7	11,3	10,2	9,8
мережа №2									
1	точні	СТ20	1,4	4,1	5,8	6,7	7,1	6,5	9,8
	бортові		5,1	10,0	10,4	10,8	10,8	9,2	9,7
2	точні	СТ25	0,0	2,8	2,2	2,6	2,3	3,5	7,2
	бортові		4,4	7,0	7,0	7,8	7,4	7,5	9,0
3	точні	СТ30	1,4	2,0	2,3	3,1	3,1	3,5	5,5
	бортові		5,2	6,2	6,3	6,4	6,1	5,5	5,1
4	точні	СТ31	0,0	1,0	0,5	0,5	0,6	0,9	1,1
	бортові		1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	1,4	1,1
5	точні	СТ33	1,0	3,0	3,7	3,9	3,6	3,4	5,2
	бортові		3,6	4,0	4,1	5,6	5,5	5,3	5,6
6	точні	СТ34	1,0	2,2	2,1	4,4	4,4	4,8	5,2
	бортові		7,1	7,3	7,7	7,7	8,3	5,1	6,8
7	точні	СТ35	1,0	3,0	4,6	5,0	4,9	5,6	6,2
	бортові		4,1	6,4	6,2	6,0	7,2	6,7	8,0
8	точні	СТ37	0,0	1,4	5,3	3,0	4,3	3,7	4,7
	бортові		2,2	2,2	3,6	3,8	4,2	4,9	5,5
9	точні	СТ38	1,4	5,0	5,2	5,4	4,7	5,5	9,0
	бортові		7,1	7,6	8,2	7,1	7,9	5,9	8,4

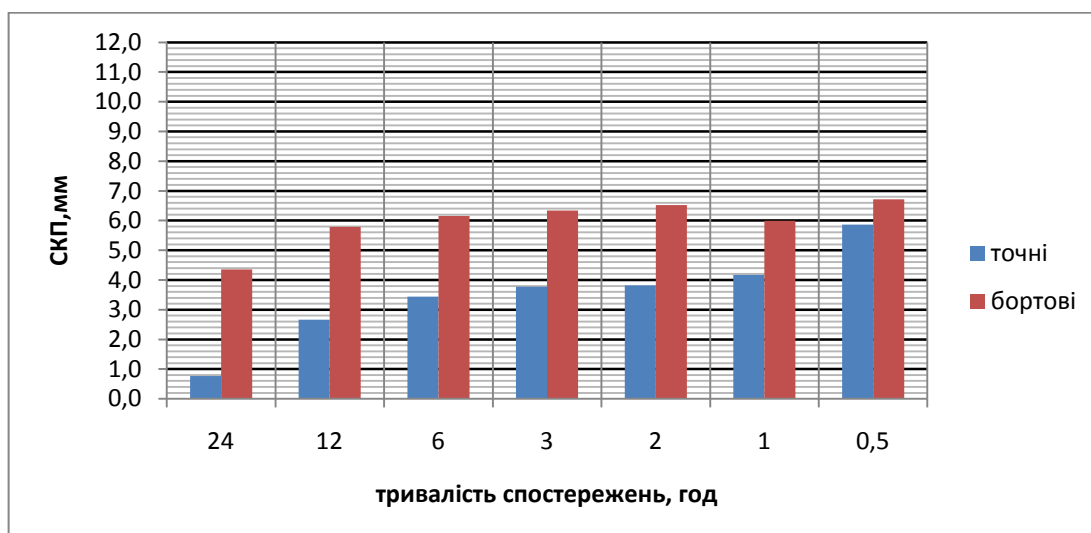
## Продовження таблиці Б.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	точні	СТ39	1,0	2,0	2,1	4,4	4,4	5,8	6,9
	бортові		7,1	10,2	11,1	9,7	9,9	10,9	9,6
11	точні	СТ42	0,0	3,2	3,7	3,7	3,6	4,0	5,8
	бортові		3,9	6,5	6,6	7,9	7,9	5,5	7,1
12	точні	LENE	1,0	2,2	3,8	2,6	2,8	2,9	3,7
	бортові		1,4	1,0	1,7	2,4	2,3	4,0	4,7
мережа №3									
1	точні	P233	1,0	2,0	2,2	2,2	2,3	3,6	5,0
	бортові		1,0	1,4	2,2	2,2	2,3	3,3	5,2
2	точні	P234	1,0	4,5	4,3	4,1	5,2	5,4	5,2
	бортові		1,5	4,5	4,3	4,3	5,4	5,3	5,2
3	точні	P235	0,0	1,4	2,6	2,4	2,3	4,3	5,0
	бортові		0,5	1,0	1,7	2,4	2,3	4,6	4,7
4	точні	P236	1,0	3,0	4,0	3,9	5,4	4,2	3,2
	бортові		0,0	3,2	4,0	4,1	5,2	4,0	3,2
5	точні	P238	1,1	2,0	2,2	2,9	3,5	3,9	4,5
	бортові		0,5	1,4	1,8	2,2	3,0	3,4	4,1
6	точні	P239	2,8	4,2	5,2	5,3	6,2	5,9	4,8
	бортові		2,5	3,0	5,2	5,6	6,2	5,3	4,7
7	точні	P240	1,0	3,2	4,1	5,7	5,0	5,4	5,6
	бортові		1,4	2,2	4,1	5,2	4,8	5,0	5,8
8	точні	P242	2,2	3,6	4,5	4,7	3,6	4,1	4,6
	бортові		3,0	3,6	4,5	4,2	3,6	3,3	4,8
9	точні	P243	3,0	4,0	4,2	3,8	3,6	4,5	4,9
	бортові		4,9	5,0	4,2	3,8	3,8	4,5	4,5
10	точні	P244	2,2	5,1	4,5	4,7	4,1	5,2	4,3
	бортові		4,5	5,1	4,5	4,9	4,1	5,3	4,1
11	точні	P250	2,2	4,1	5,3	4,6	4,0	5,6	4,5
	бортові		2,4	6,1	5,3	5,0	3,8	5,6	4,9
12	точні	P251	1,0	2,8	2,5	2,9	3,8	5,3	5,7
	бортові		2,5	2,8	2,5	3,1	4,1	5,0	5,4
13	точні	P787	1,0	2,2	3,2	3,8	3,2	3,7	4,5
	бортові		1,8	2,2	3,2	3,5	3,4	3,7	4,3

## мережа №1



## мережа №2



## мережа №3

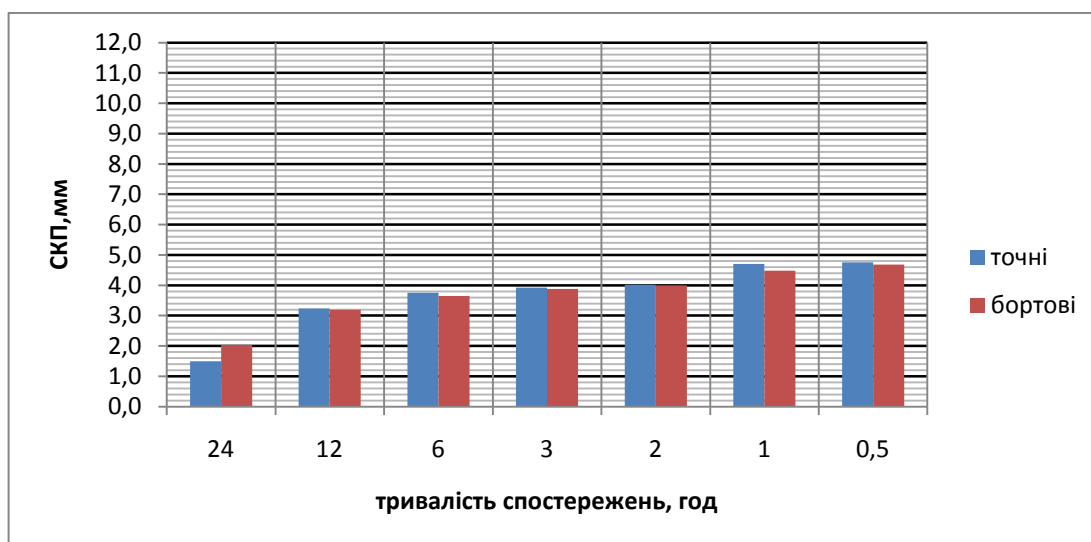


Рис. Б.1. Графіки залежності точності визначення положення пунктів від типу ефемерид (бортові, остаточні) при різній тривалості спостережень

**Додаток В**  
**АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ**  
**ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**



«7» листопада 2014 р. № 246

**Ректору**  
**Національного університету**  
**«Львівська політехніка»**  
**проф. д.т.н. Бобалу Юрію Ярославовичу**

Державне підприємство «Закарпатський геодезичний центр» підтверджує, що результати дисертаційної роботи Пішко Юлії Романівни «Актуалізація параметрів методики відносних супутникових спостережень для створення опорних геодезичних мереж», представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія і кадастр» є актуальними і використовуються при створенні опорних геодезичних мереж із застосуванням глобальних супутникових навігаційних систем.

Отримані Пішко Ю.Р. результати дозволяють виконувати відносні статичні спостереження з врахуванням проведеної в останнє десятиліття модернізації системи NAVSTAR GPS та введення в дію системи GLONASS. Виведені в роботі формули для оцінки точності довжин векторів та положення пунктів використовуються для апіорної оцінки проектів опорних геодезичних мереж, створюваних супутниковими методами.

**Директор**  
**ДП «Закарпатгеодезцентр»**



**І.І. Проданець**



Затверджую  
Проректор з наукової роботи  
Н.І. Чухрай  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 р.

**АКТ**

про використання результатів дисертаційної роботи Пішко Юлії Романівни, представленої на здобуття наукового ступеня к.т.н. при виконанні наукової теми кафедри інженерної геодезії Національного університету "Львівська політехніка" "Вдосконалення технології виконання інженерно-геодезичних робіт та моніторинг геодинамічних явищ і споруд" (№ ДР 0114U005458)

Заступник начальника НДЧ к.т.н., доц. Жук Л.В.  
та комісія у складі:

к.т.н., доцента кафедри інженерної геодезії. Торопи І.М,  
зав. відділу організації наукових досліджень та маркетингу Віннічек Н.Р.,  
заст. начальника планово-фінансової групи Чулой Т.М.

цим актом підтверджують, що результати дисертаційного дослідження асистента кафедри інженерної геодезії Пішко Ю.Р, які отримані при написанні другого розділу "Визначення точності довжин векторів в мережах, створених з допомогою супутникових систем GPS та ГЛОНАСС", використані при розробці наукової теми "Вдосконалення технології виконання інженерно-геодезичних робіт та моніторинг геодинамічних явищ і споруд". Пішко Ю.Р. належать опрацювання сеансів супутникових спостережень різної тривалості, обчислення середніх квадратичних помилок (СКП) довжин векторів, виведення формул СКП довжин векторів, отриманих за результатами спостережень дво- і одночастотними приймачами в залежності від параметрів мереж. Отримані нею формули рекомендовано для практичного застосування при апріорній оцінці точності проектів супутникових мереж, вже використовуються у виробництві, а також у розрахунково-графічній роботі на тему "Проект створення із застосуванням ГНСС геодезичної основи для знімання територій в крупних масштабах" з дисципліни "Технології ГНСС в інженерній геодезії" для студентів стаціонарної та заочної форми навчання освітньо-кваліфікаційного рівня "Магістр".

Заступник начальника НДЧ  
к.т.н., доц.  
Члени комісії:  
доцент к.т.н.  
зав. відділу організації наукових досліджень та маркетингу  
заступник начальника ПФВ

Л.В. Жук

І.М. Торопа

Н.Р. Віннічек

Т.М. Чулой

"ЗАТВЕРДЖУЮ"



Проректор з науково-педагогічної роботи

Давидчак О. Р.

про впровадження в навчальний процес результатів науково-дослідної роботи  
 Пішко Ю.Р. за темою кандидатської дисертації  
 "Актуалізація параметрів методики відносних супутникових спостережень для  
 створення опорних геодезичних мереж"

За результатами досліджень, виконаних Пішко Ю.Р., отримані функціональні залежності точності визначення довжини вектора від тривалості сеансів спостережень, віддалі між одночасно працюючими приймачами та типу приймачів, які можна застосувати при проектування супутникових мереж для апріорної оцінки їх точності. Ці результати використовуються у розрахунково-графічній роботі на тему "Проект створення із застосуванням ГНСС геодезичної основи для знімання територій в крупних масштабах" з дисципліни "Технології ГНСС в інженерній геодезії" для студентів стаціонарної та заочної форми навчання освітньо-кваліфікаційного рівня "Магістр" спеціальності 8.08010101 "Геодезія".

Директор Інституту геодезії  
 Голова навчально-методичної комісії  
 Завідувач кафедри інженерної геодезії

Третяк К.Р.  
 Тревого І.С.  
 Костецька Я.М.