

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ГЕОДЕЗІЇ

БЕЦ АНГЕЛІНА ВІКТОРІВНА

УДК 504.05:631

**ОБРОБКА ДАНИХ ПОСТІЙНИХ GNSS -СПОСТЕРЕЖЕНЬ МЕРЕЖ
GEOTERRACE ТА SYSTEM.NET ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СУЧАСНИХ
ГОРИЗОНТАЛЬНИХ І ВЕРТИКАЛЬНИХ РУХІВ ЗЕМНОЇ КОРИ
УКРАЇНИ**

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

Науковий керівник:
кандидат технічних наук, доцент
Паламар Альона Юріївна

Кривий Ріг – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: будівельний

Кафедра: геодезії

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Спеціальностей: G18 – Геодезія та землеустрій

Затверджую

Зав. кафедрою Перегудов В.В.

«_____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на бакалаврську роботу
БЕЦ АНГЕЛІНИ ВІКТОРІВНИ

Тема роботи: ОБРОБКА ДАНИХ ПОСТІЙНИХ GNSS -
СПОСТЕРЕЖЕНЬ МЕРЕЖ GEOTERRACE ТА SYSTEM.NET ДЛЯ
ВИЗНАЧЕННЯ СУЧАСНИХ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ І ВЕРТИКАЛЬНИХ
РУХІВ ЗЕМНОЇ КОРИ УКРАЇНИ

1. Керівник роботи: к.т.н., доцент Паламар А.Ю.

Затверджено наказом по КНУ від _____

2. Термін здачі студентом закінченої роботи « 01 » червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: Глобальні та континентальні мережі перманентних GNSS станцій; Національні мережі референцних GNSS станцій; Глобальні, регіональні та національні референцні системи координат; Загальні відомості про процес опрацювання GNSS-даних з використанням програмного пакету GIPSY в Центрі аналізу LPI; Координати референцних GNSS-станцій України в системі УСК-2000.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити):

1. ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ ТА РОЗВИТКУ ГЛОБАЛЬНОЇ GNSS МЕРЕЖИ.

2. СИСТЕМА GPS ТА ЇЇ РОЛЬ У СТВОРЕННІ GNSS МЕРЕЖИ

3. ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ GNSS МЕРЕЖИ УКРАЇНИ.

4. СУЧАСНИЙ СТАН GNSS МЕРЕЖИ УКРАЇНИ.

5. МЕРЕЖА UA-EUPOS/ZAKPOS.

6. МЕРЕЖА GNSS СТАНЦІЙ ДЕРЖГЕОКАДАСТРУ.

5. Перелік графічного матеріалу:

1. ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ ТА РОЗВИТКУ ГЛОБАЛЬНОЇ GNSS МЕРЕЖИ.

2. СИСТЕМА GPS ТА ЇЇ РОЛЬ У СТВОРЕННІ GNSS МЕРЕЖИ

3. ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ GNSS МЕРЕЖИ УКРАЇНИ.

4. СУЧАСНИЙ СТАН GNSS МЕРЕЖИ УКРАЇНИ.

5. МЕРЕЖА UA-EUPOS/ZAKPOS.

ГРАФІК
підготовки бакалаврської роботи

Найменування розділів, перелік розроблюваних питань	Терміни подання науковому керівнику та консультантам	Примітка
1 ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ ТА РОЗВИТКУ ГЛОБАЛЬНОЇ GNSS МЕРЕЖИ		
2 ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ GNSS МЕРЕЖІ УКРАЇНИ		
3 СУЧАСНИЙ СТАН GNSS МЕРЕЖІ УКРАЇНИ		

Підписи консультантів і нормоконтролеру на закінчену бакалаврську роботу
із зазначенням розділів

Назва (номер розділів)	Науковий керівник, консультанти (ПІБ, науковий ступінь, наукове звання)	Дата підписання	Підпис
1 ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ ТА РОЗВИТКУ ГЛОБАЛЬНОЇ GNSS МЕРЕЖИ			
2 ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ GNSS МЕРЕЖІ УКРАЇНИ			
3 СУЧАСНИЙ СТАН GNSS МЕРЕЖІ УКРАЇНИ			

Науковий керівник _____ / /

Завдання прийняв до виконання _____ / /

Дата «_____» _____ 2026 р

АНОТАЦІЯ

У бакалаврській роботі досліджено особливості обробки даних постійних GNSS-спостережень мереж GeoTerrace та System.NET для визначення сучасних горизонтальних і вертикальних рухів земної кори України. Робота присвячена актуальним питанням супутникової геодезії та геодинамічного моніторингу територій із використанням високоточних методів координатних визначень.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю забезпечення високої точності визначення просторового положення геодезичних пунктів у сучасних системах координат та потребою контролю змін земної поверхні під впливом природних і техногенних процесів. Постійні рухи земної кори впливають на стабільність геодезичних мереж, точність кадастрових робіт, інженерно-геодезичне забезпечення будівництва та функціонування геоінформаційних систем, що зумовлює необхідність їх систематичного дослідження.

У роботі розглянуто теоретичні основи функціонування глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), принципи організації мереж постійно діючих референцних станцій та методи визначення координат за результатами безперервних супутникових спостережень. Значну увагу приділено аналізу сучасних підходів до обробки GNSS-даних, побудови часових рядів координат та оцінювання змін просторового положення геодезичних пунктів.

Для виконання дослідження використано дані постійних GNSS-спостережень мереж GeoTerrace та System.NET, що забезпечують накопичення координатної інформації на території України. У процесі роботи виконано аналіз структури вихідних даних, оцінювання якості спостережень, дослідження координатних змін та визначення швидкостей горизонтальних і вертикальних переміщень земної кори.

Під час обробки даних застосовано сучасні методи супутникової геодезії, математичної статистики, аналізу часових рядів та обчислювальні алгоритми визначення координатних параметрів. Проведено оцінювання точності отриманих результатів та аналіз впливу тривалості спостережень і конфігурації мережі на достовірність визначення сучасних геодинамічних процесів.

За результатами дослідження встановлено можливість ефективного використання даних мереж постійних GNSS-спостережень для моніторингу сучасних рухів земної кори України. Підтверджено доцільність застосування довгострокових супутникових спостережень для підвищення точності геодезичних визначень, підтримання актуальності координатних систем та забезпечення геодинамічного контролю територій.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для виконання геодезичних, землевпорядних, кадастрових та інженерно-вишукувальних робіт, а також для розвитку систем геодинамічного моніторингу території України.

Ключові слова: GNSS, постійні GNSS-спостереження, GeoTerrace, System.NET, горизонтальні рухи, вертикальні рухи, земна кора, геодинаміка, геодезичний моніторинг, координатні визначення, часові ряди, супутникова геодезія, референсні станції, геопросторові дані.

ЗМІСТ

Розділ	Ст
Розділ 1	ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОБРОБКИ ДАНИХ ПОСТІЙНИХ GNSS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СУЧАСНИХ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ТА ВЕРТИКАЛЬНИХ РУХІВ ЗЕМНОЇ КОРИ УКРАЇНИ
1.1	Сучасні рухи земної кори та їх значення для геодезичних досліджень
1.1.1	Традиційні методи дослідження вертикальних і горизонтальних рухів земної кори
1.2	Рухи земної кори та класифікація факторів, які на них впливають
1.3	Супутникові навігаційні системи як інструмент геодинамічного моніторингу
1.4	Постійно діючі GNSS-мережі України
1.5	Визначення горизонтальних рухів земної кори
1.6	Визначення вертикальних рухів земної кори
1.7	Аналіз часових рядів координат GNSS-станцій
	ВИСНОВОК ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ
Розділ 2	МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ТА ВЕРТИКАЛЬНИХ РУХІВ ЗЕМНОЇ КОРИ
2.1	Загальна характеристика ГНСС-мереж GeoTerrace та System.NET
2.2	Вихідні дані дослідження та критерії відбору ГНСС-станцій
2.3	Особливості формування просторово-часових рядів координат
2.4	Методика визначення горизонтальних швидкостей зміщень
2.5	Методика визначення вертикальних швидкостей зміщень
2.6	Порівняння результатів із моделлю ITRF-2020 та системою ETRF-2020
	ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ
Розділ 3	РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ СУЧАСНИХ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ТА ВЕРТИКАЛЬНИХ РУХІВ ЗЕМНОЇ КОРИ УКРАЇНИ ЗА ДАНИМИ ПОСТІЙНИХ GNSS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ
3.1	Формування часових рядів координат GNSS-станцій
3.2	Аналіз сучасних вертикальних рухів земної кори України
3.3	Аналіз горизонтальних рухів земної кори
3.4	Порівняння результатів з моделлю ITRF2020

3.5 Геодинамічна інтерпретація результатів
ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ
ДОДАТКИ

Додаток А. Карта вертикальних швидкостей зміщень ГНСС-станцій.

Додаток Б. Карта горизонтальних швидкостей зміщень ГНСС-станцій.

Додаток В. Таблиці швидкостей зміщень станцій GeoTerrace та System.NET.

Додаток Г. Карта тектонічних структур України.

Додаток Д. Результати порівняння з моделлю ITRF-2020.

ВСТУП

Сучасний розвиток геодезії, картографії, землеустрою та геоінформаційних технологій характеризується активним впровадженням високоточних супутникових методів визначення координат та просторового положення об'єктів. Одним із найважливіших напрямів сучасних геодезичних досліджень є вивчення сучасних рухів земної кори, які мають суттєве значення для формування та підтримання державних геодезичних систем координат, розвитку кадастрових систем, моніторингу природних процесів і забезпечення безпеки інженерних споруд.

У сучасних умовах просторове положення об'єктів земної поверхні не є постійним, оскільки територія перебуває під впливом складних геодинамічних процесів. До таких процесів належать тектонічні переміщення літосферних плит, регіональні вертикальні рухи, локальні деформації земної поверхні, техногенний вплив господарської діяльності, зміни геологічного середовища та інші фактори. У результаті цього координати геодезичних пунктів поступово змінюються, що безпосередньо впливає на точність визначення місцеположення об'єктів та ефективність використання геопросторових даних.

Для вирішення завдань високоточного моніторингу просторових змін дедалі ширше застосовуються глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), які забезпечують можливість безперервного визначення координат у глобальних та національних системах координат із високою точністю. Використання GNSS-технологій створило принципово нові можливості для геодезичних досліджень, оскільки дозволяє отримувати координатну інформацію в режимі реального часу та накопичувати довготривалі часові ряди координатних визначень.

Особливе місце у системі сучасного геодезичного забезпечення займають постійно діючі референсні GNSS-станції, що утворюють мережі безперервних супутникових спостережень. Такі мережі забезпечують

стабільне отримання координатної інформації, створюють основу для функціонування сучасних систем координат та дозволяють проводити моніторинг геодинамічних процесів на локальному, регіональному та державному рівнях.

На території України важливе значення для розвитку супутникової геодезії мають мережі постійних GNSS-спостережень GeoTerrace та System.NET, які забезпечують користувачів високоточними координатними даними та підтримують виконання широкого спектра геодезичних робіт. Дані мережі використовуються для виконання кадастрових робіт, інженерно-геодезичних вишукувань, створення картографічної продукції, забезпечення будівництва, моніторингу деформацій та наукових досліджень.

Використання результатів безперервних супутникових спостережень відкриває можливість не лише визначати координати пунктів із високою точністю, але й досліджувати їх часову змінність. Аналіз координатних рядів дозволяє визначати швидкості сучасних горизонтальних і вертикальних переміщень земної кори, оцінювати характер геодинамічних процесів та встановлювати закономірності розвитку деформаційних явищ.

Особливої актуальності питання моніторингу сучасних рухів земної кори набуває в умовах необхідності підтримання актуальності державних координатних систем, підвищення точності геодезичного забезпечення та забезпечення просторової узгодженості геоінформаційних ресурсів. Визначення навіть незначних змін координат геодезичних пунктів має важливе значення для функціонування кадастрових систем, проведення інженерних вишукувань, виконання високоточних будівельних робіт та забезпечення геодинамічного контролю територій.

Використання сучасних методів обробки GNSS-спостережень дозволяє підвищити достовірність результатів та забезпечити отримання високоточних координатних рішень. Обробка супутникових даних включає комплекс процедур, пов'язаних із контролем якості спостережень, математичним

моделюванням похибок, аналізом часових рядів координат та статистичною оцінкою результатів.

Наукова та практична цінність дослідження полягає у можливості використання результатів аналізу GNSS-спостережень для оцінювання сучасних геодинамічних процесів на території України та вдосконалення систем геодезичного моніторингу.

Метою бакалаврської роботи є дослідження особливостей обробки даних постійних GNSS-спостережень мереж GeoTerrace та System.NET для визначення сучасних горизонтальних і вертикальних рухів земної кори України та оцінювання можливостей використання отриманих результатів у геодезичній практиці.

Для досягнення поставленої мети визначено такі **завдання дослідження**:

- проаналізувати сучасний стан розвитку супутникових геодезичних технологій;
- дослідити принципи функціонування мереж постійних GNSS-спостережень;
- виконати аналіз структури та особливостей роботи мереж GeoTerrace та System.NET;
- дослідити методи обробки результатів супутникових спостережень;
- виконати оцінювання координатних змін у часових рядах;
- визначити сучасні горизонтальні та вертикальні рухи земної кори;
- провести аналіз точності отриманих результатів;
- оцінити можливість практичного використання результатів дослідження.

Об’єктом дослідження є процеси визначення сучасних геодинамічних змін земної поверхні за результатами супутникових геодезичних спостережень.

Предметом дослідження є методи обробки даних постійних GNSS-спостережень мереж GeoTerrace та System.NET для визначення горизонтальних і вертикальних переміщень земної кори.

У процесі виконання роботи використовувалися методи супутникової геодезії, математичної статистики, аналізу часових рядів координат, геодинамічного моделювання та методи комп'ютерної обробки геопросторових даних.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розроблених підходів та отриманих висновків для підвищення точності геодезичних вимірювань, підтримання актуальності координатних систем, виконання кадастрових та інженерно-геодезичних робіт, а також здійснення моніторингу сучасних геодинамічних процесів на території України.

Таким чином, виконання бакалаврської роботи спрямоване на вирішення актуального науково-практичного завдання сучасної геодезії та підтверджує важливість використання мереж постійних GNSS-спостережень для забезпечення високоточного визначення сучасних рухів земної кори.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОБРОБКИ ДАНИХ ПОСТІЙНИХ GNSS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СУЧАСНИХ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ТА ВЕРТИКАЛЬНИХ РУХІВ ЗЕМНОЇ КОРИ УКРАЇНИ

1.1. Сучасні рухи земної кори та їх значення для геодезичних досліджень

Земна кора перебуває у стані постійного руху, що обумовлено дією внутрішніх і зовнішніх геодинамічних процесів. Такі процеси проявляються у вигляді горизонтальних і вертикальних переміщень окремих ділянок земної поверхні, які можуть мати як природне, так і техногенне походження. Вивчення сучасних рухів земної кори є одним із важливих напрямів геодезичної науки, оскільки отримані результати використовуються для вдосконалення державних геодезичних мереж, моніторингу небезпечних геологічних процесів, забезпечення високоточного позиціонування та прогнозування розвитку геодинамічних явищ.

Сучасні рухи земної кори характеризуються зміною просторового положення пунктів спостережень у часі. Залежно від напрямку переміщень вони поділяються на горизонтальні та вертикальні. Горизонтальні рухи пов'язані переважно з тектонічними процесами та переміщенням літосферних плит, тоді як вертикальні можуть бути наслідком підняття або опускання земної поверхні внаслідок геологічних, гідрогеологічних чи антропогенних чинників.

Для території України дослідження сучасних рухів земної кори має особливе значення через складну геологічну будову, наявність активних тектонічних зон Карпатського регіону, Дніпровсько-Донецької западини, Причорноморського регіону та районів інтенсивної гірничодобувної діяльності. Отримання достовірної інформації про швидкості деформацій дозволяє оцінювати стан геодинамічної стабільності територій та своєчасно виявляти потенційно небезпечні процеси.



Рисунок 1.1 – Класифікація сучасних рухів земної кори

Представлена схема відображає основні типи сучасних рухів земної кори. Горизонтальні переміщення пов'язані переважно з тектонічними процесами та переміщенням літосферних плит, тоді як вертикальні рухи характеризуються підняттям або опусканням земної поверхні.



Рисунок 1.2 – Геодинамічні процеси, що впливають на земну кору

Основними причинами сучасних деформацій земної кори є ендегенні, екзогенні та техногенні процеси. Для України найбільше значення мають тектонічні рухи та вплив гірничодобувної діяльності.

Рисунок 1.3 – Принцип визначення рухів земної кори за даними GNSS

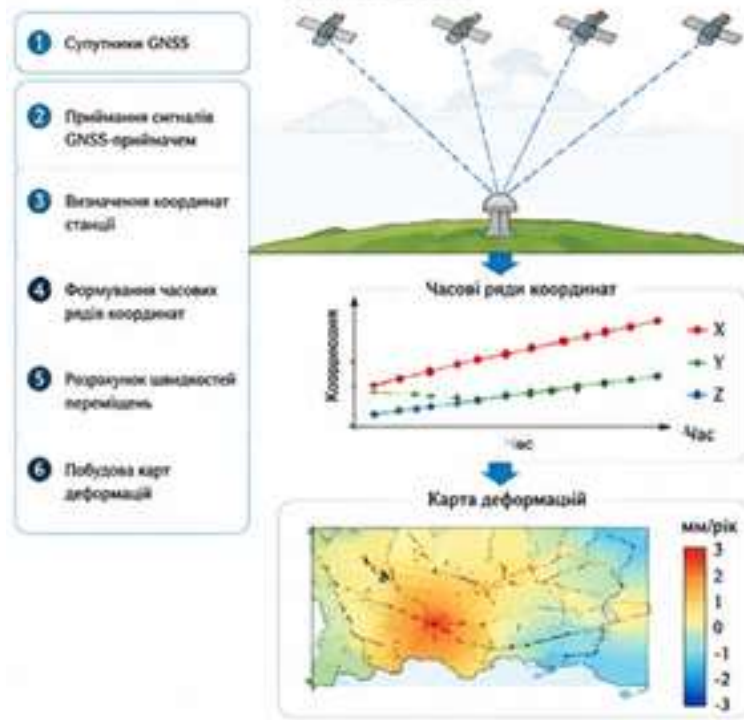


Рисунок 1.3 – Принцип визначення рухів земної кори за даними GNSS

GNSS-технології дозволяють отримувати безперервні дані про координати пунктів спостережень та визначати швидкості їх зміщення.



Рисунок 1.4 – Основні літосферні плити Землі

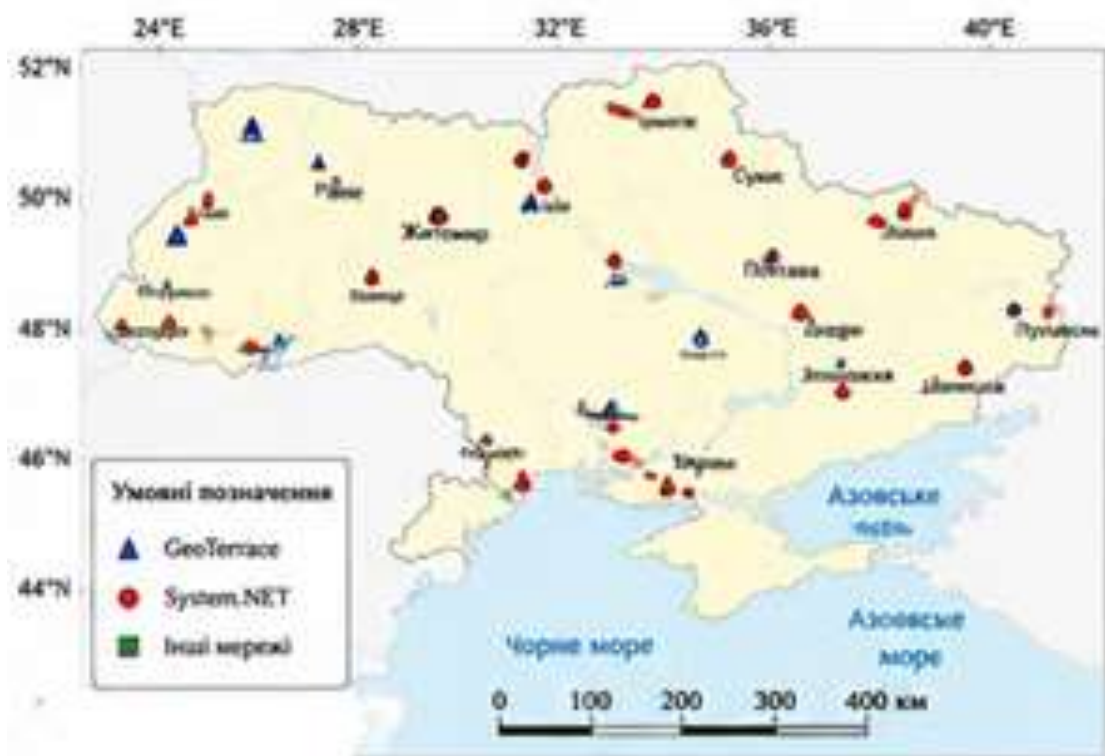
Україна знаходиться в межах Євразійської літосферної плити, що визначає характер сучасних горизонтальних переміщень її території.

Рисунок 1.5 – Карта тектонічної будови України (схематично)



Тектонічна будова України є неоднорідною, що обумовлює різну інтенсивність сучасних деформацій земної кори в окремих регіонах.

Рисунок 1.6 – Карта розташування GNSS-станцій України



Постійно діючі GNSS-станції рівномірно розташовані по території України та забезпечують безперервний геодинамічний моніторинг.

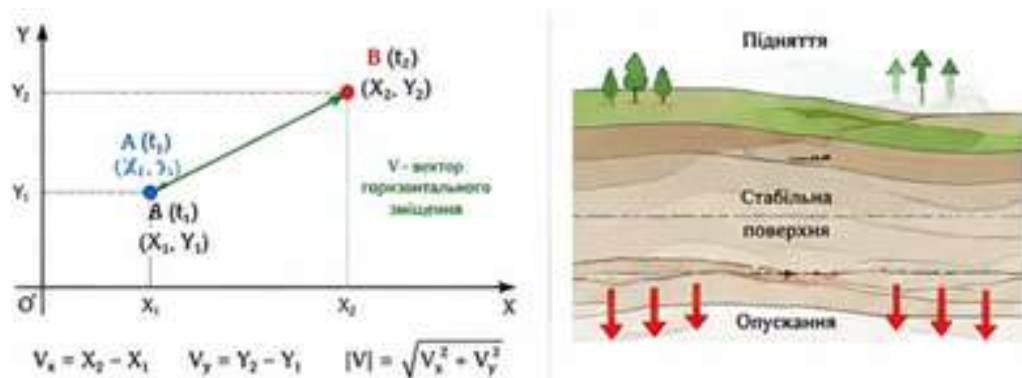


Рисунок 1.7 – Схема горизонтального зміщення пункту

Вектор V характеризує напрямок та величину горизонтального переміщення геодезичного пункту між двома епохами спостережень. Вертикальні рухи характеризують зміну висотного положення земної поверхні під впливом природних або техногенних факторів.

1.1.1 Традиційні методи дослідження вертикальних і горизонтальних рухів земної кори

Вивчення сучасних вертикальних і горизонтальних рухів земної кори є одним із важливих напрямів геодезичних і геодинамічних досліджень. Отримані результати використовуються для моніторингу деформацій земної поверхні, оцінки геодинамічної активності територій, створення та підтримання державних геодезичних мереж, а також забезпечення точності топографо-геодезичних робіт.

Геодезичні мережі, призначені для дослідження рухів земної кори, створюються з метою виявлення та контролю:

- зон активних деформацій земної поверхні;
- сучасних тектонічних рухів земної кори;
- переміщень окремих блоків літосфери;
- змін параметрів обертання Землі та руху її полюсів;
- регіональних і глобальних геодинамічних процесів.

Основою виконання таких досліджень є державна геодезична мережа, яка забезпечує єдину координатну та висотну основу для проведення геодезичних вимірювань на території країни. Дані мережі використовуються під час створення топографічних карт і планів, виконання кадастрових робіт, будівництва інженерних споруд та здійснення геодинамічного моніторингу.

Державна геодезична мережа України являє собою систему взаємопов'язаних геодезичних пунктів, координати яких визначені з високою точністю та закріплені на місцевості спеціальними центрами. Вона забезпечує виконання наукових, оборонних, інженерних та господарських завдань державного значення.

Традиційно побудова державних геодезичних мереж здійснювалася методами тріангуляції, трилатерації, полігонометрії та їх комбінуванням. Планові координати пунктів визначалися шляхом вимірювання кутів і довжин сторін геодезичних фігур, а висотне положення встановлювалося за результатами геометричного, тригонометричного або гідростатичного нівелювання.

Геодезична мережа являє собою систему взаємопов'язаних пунктів, розташованих на земній поверхні, між якими виконуються високоточні геодезичні вимірювання. У класичних тріангуляційних мережах основними геометричними елементами виступають трикутники, у яких вимірюються горизонтальні кути та базисні сторони. Після математичної обробки результатів спостережень мережу редукують на поверхню прийнятого земного еліпсоїда, що дає можливість визначити координати всіх пунктів у єдиній державній системі координат.

Використання традиційних геодезичних методів протягом тривалого часу забезпечувало отримання достовірної інформації про деформації земної поверхні. Саме на основі багаторазових циклів тріангуляції, полігонометрії та високоточного нівелювання були отримані перші відомості про сучасні вертикальні та горизонтальні рухи земної кори в Україні та інших країнах світу. Незважаючи на активне впровадження супутникових технологій GNSS,

традиційні геодезичні методи й сьогодні залишаються важливим джерелом контролю та перевірки результатів геодинамічних досліджень.

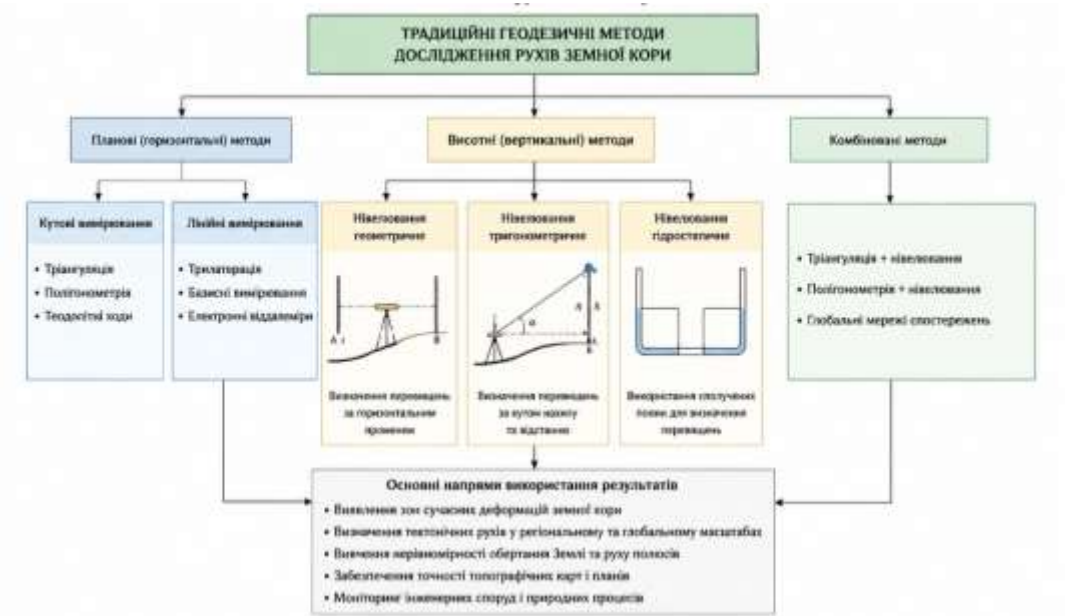


Рисунок 1.8 – Класифікація традиційних методів дослідження рухів земної кори.



Рисунок 1.9 – Схема триангуляційної мережі. Схема полігонометричного ходу. Схема геометричного нівелювання.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика традиційних геодезичних методів

Метод	Призначення	Вимірювані величини	Переваги	Недоліки	Область застосування
Триангуляція	Створення планових геодезичних мереж	Кути, базисні сторони	Висока точність, надійність мережі на великих територіях	Великі затрати часу, потреба у взаємній видимості	Державні мережі, геодинамічні дослідження
Полігонометрія	Згущення мереж, зняття місцевості	Кути, довжини сторін	Простота виконання, можливість роботи в складних умовах	Менша точність, накопичення помилок	Місцеві мережі, топографічне знімання
Геометричне нівелювання	Визначення висот, вертикальних рухів	Відліки по рейках, перевищення	Висока точність, безпосереднє визначення перевищень	Трудомісткість, залежність від рельєфу	Висотні мережі, моніторинг деформацій
Тригонометричне нівелювання	Визначення висот на великих відстанях	Кути нахилу, відстані	Можливість роботи на великих відстанях	Менша точність порівняно з геометричним	Присьма місцевості, інженерно-технічні роботи
Гідростатичне нівелювання	Визначення висот через рівень рідини	Різниця рівнів рідини	Висока точність, незалежність від рельєфу	Потреба у сполучених посудинах, довгий час	Висотні мережі особливої точності

Таблиця 1.2 – Точність визначення горизонтальних і вертикальних переміщень різними методами

Метод	Горизонтальні переміщення		Вертикальні переміщення	
	Точність визначення (мм)	Діапазон відстаней (км)	Точність визначення (мм)	Діапазон висот (м)
Триангуляція	2 – 10	10 – 100	–	–
ПолігонOMETрія	5 – 20	1 – 20	–	–
Геометричне нівелювання	–	–	0,3 – 1,0	до 500
Тригонометричне нівелювання	–	–	5 – 20	до 2000
Гідростатичне нівелювання	–	–	0,1 – 0,5	до 100
GNSS (сучасний метод)	1 – 5	будь-які	2 – 10	будь-які

1.1.2 Рухи земної кори та класифікація факторів, які на них впливають

Питанням дослідження вертикальних рухів земної кори присвячена значна кількість наукових праць вітчизняних і зарубіжних авторів; вагомий внесок для вирішення цього питання зробили такі відомі вчені, як Сомов В.І., Мещеряков Ю.О., Кузнєцова В.Г., Гофштейн І.Д., Третяк К.Р., Смірнова О.М., Скриль В.А., Гусєва Т.В., Галаганов О.М., Kowalczyk K., Rajner M., Santamaría-Gómez A., Bouin M.N., Wöppelmann G., Zervas Ch., Altamimi Z., Kuo C.Y., Shum C.K., Mäkinen J., Saaranen V., Lidberga M., Nordman M., Pettersen B., Church J.A., White N.J., Nerem R.S., Mitchum G.T., García F., Cazenave A. та інші.

Авторами виконано огляд методів визначення вертикальних рухів земної кори, на основі якого встановлено їх переваги та недоліки, характеристики точності й ефективності їх застосування в просторово-часовому аспекті. Представлено детальний аналіз мареографічних спостережень і доведено його ефективність, порівняно з іншими методами, для вивчення вікових рухів земної кори.

При використанні мареографічних часових серій необхідно врахувати всі чинники, які впливають на рівень моря, і встановити необхідні тривалості мареографічних спостережень для визначення ВРЗК.

В дисертаційному дослідженні Досин С. І. [31] на тему: «Визначення швидкостей вікових вертикальних рухів земної кори за даними мареографічних та GNSS-спостережень (на прикладі Європейського континенту)», розроблено методику оцінювання точності визначення вертикальних рухів земної кори, яка базується на тривалих мареографічних спостереженнях; встановлено залежності зміни швидкості вікових вертикальних рухів земної кори від періоду усереднення результатів мареографічних спостережень; проведено, на основі аналізу GNSS-спостережень і результатів мареографічних вимірювань, розподіл систематичних різниць у результатах визначення вертикальних рухів земної кори; з метою виконання реконструкції вертикальних рухів земної кори в минулому і, ймовірно, прогнозування зміни поля швидкостей у часі розроблено теоретичні засади та методику визначення кінематичних параметрів лінійного поля швидкостей вертикальних рухів земної кори умовно жорстких тектонічних плит за даними тривалих мареографічних спостережень; за результатами опрацювання мареографічних спостережень побудовано кінематичну модель поля швидкостей умовно виділених тектонічних блоків території Європи [29, 30].

В дисертації Вовк А.І. [32] на основі опрацювання щорічних серій результатів ГНСС-спостережень на території Європи виділено шість умовних блоків земної кори зі своїми сталими кінематичними характеристиками; границі цих блоків збігаються з основними тектонічними структурами на території Європи.

В роботі визначено усереднені значення річних параметрів деформації земної кори на території Європи за період 2000 – 2010 роки (значення дилатації, загального зсуву земної кори та значення осей деформацій земної кори). Встановлено щорічні місця проявлення екстремальних значень деформаційних параметрів земної кори Європи, які пов'язані з основними тектонічними розломами та місцями підвищеної сейсмічної активності на території Європи. На основі результатів ГНСС-вимірів розроблено

математичний алгоритм та методику, що дозволяє проводити диференціацію тектонічних блоків земної кори за ротаційними параметрами [33].

Для того, щоб розглядати фактори, які впливають на рухи земної кори, спочатку необхідно дати визначення земної кори. Земна кора – зовнішній шар [земної кулі](#), одна зі структурних оболонок [планети](#), як [ядро](#), [мантия](#). Земна кора є твердим утворенням товщиною 5 – 40 км, що становить 0,1 – 0,5 % радіуса Землі. Земна кора являється головним джерелом знань про Землю в цілому, а також місцем, в якому зосереджені всі корисні копалини, які видобувають на нашій планеті. В цілому, земна кора простягається до поверхні Мохоровичича, тобто – це границя між базальтовим шаром та мантиєю [31].

Фактично земна кора ніби плаває на поверхні [магми](#), і тому на планеті спостерігаються її деформації та рухи. В основі сучасних уявлень про структуру лежать геофізичні дані про швидкість поширення пружних (переважно [поперечних](#)) хвиль [31].

Земна кора зазнає переміщень у різні сторони в результаті дії різноманітних сил згенерованих: теплом, яке вивільнюється внаслідок розпаду радіоактивних елементів в глибинах землі; рухами тектонічних плит внаслідок тектоногенезу; силами, згенерованими обертанням землі; кліматичними силами; ізостазією. В результаті цих рухів, які почалися з часу утворення земної кори (4,6 млрд. років тому), з'явилися гірські системи, океани і моря, великі западини на континентах. Ці рухи дуже різноманітні, як за швидкістю так і напрямком руху. Про рухи земної кори почали писати вже в Середньовіччі. Сьогодні ці рухи і їх наслідки вивчає геотектоніка [31].

За даними дисертаційного дослідження [31] вивчення сучасних рухів земної кори – одна з актуальних задач науки про Землю, яка має вагомое теоретичне і практичне значення. У наш час існують різноманітні методи спостережень за рухами земної кори, зокрема, їх досліджують за допомогою геодезичних, геофізичних, геоморфологічних і океанографічних методів [31].

Земна кора, як і [гідросфера](#), є рухомою системою. Глибинними розломами земна кора розділена на [блоки](#) (рис. 1.4). В результаті взаємодії

двох сил – тяжіння Землі до [Місяця](#) і відцентрової внаслідок обертання Місяця навколо Землі, виникають добові вертикальні рухи земної кори а також [припливи](#) і [відпливи](#) води в океанах і [морях](#). Подібно такі рухи відбуваються за рахунок обертання Землі разом з Місяцем довкола [Сонця](#). Встановлено, що такі плавні рухи земної кори відбуваються двічі протягом доби і досягають амплітуди декількох десятків сантиметрів. Напрямки цих рухів не є постійними, вони періодично змінюються. У масштабі мільйонів років вони викликали [затоплення морем](#) величезних територій і навпаки – виникнення та ріст [гірських масивів](#). Унаслідок такого піднімання земної кори ростуть [молоді гори](#), наприклад структури [альпійської гірської системи](#), до якої належать і [Крим](#), і [Карпати](#). Геофізичними дослідженнями встановлено, що зараз поверхня Карпат піднімається зі швидкістю 0,1 – 10 мм за рік.

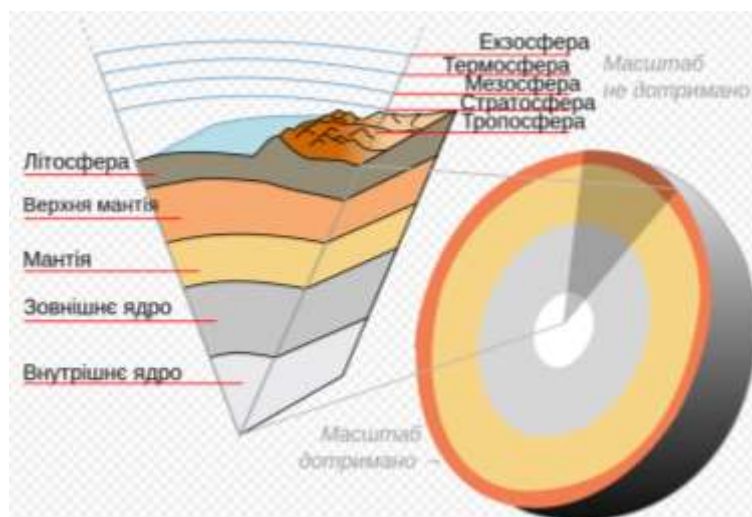


Рис. 1.10 – Будова земної кори

В загальному, тектонічні рухи – механічні рухи земної кори, що викликаються силами, які діють в земній корі і головним чином в мантії Землі, що приводять до деформації гірських порід що її складають.

Повільні плавні безперервні вертикальні переміщення мас гірських порід; одна з форм тектонічних рухів. Причину їх вбачають у глибинних процесах, що відбуваються в мантії Землі. Коливальні рухи земної кори впливають на зміни рівня Світового океану, що є однією з причин [трансресій](#) та [регресії](#) моря, на склад, шаруватість і потужність осадів, на інтенсивність процесів денудації тощо.

Існує декілька класифікацій рухів земної кори:

1. За напрямком тектонічні рухи поділяють на переважно вертикальні (радіальні) та горизонтальні (тангенціальні). *Вертикальні рухи* виражаються в систематичному піднятті (або опусканні) літосферних плит. *Горизонтальні рухи* являють собою зміщення літосферних плит. Відповідно до думки багатьох вчених, всі існуючі материки утворилися в результаті горизонтального зсуву плит літосфери.

2. За областю прояву рухів земної кори виділяють: поверхневі, глибинні, надглибинні та планетарні. Поверхневі рухи виявляються у осадовому шарі літосфери. Поверхневі тектонічні рухи переважно проявляються в осадовому шарі літосфери. Викликано це тим, що в його складі широко розвинуті пластичні породи, які складені глинами, кам'яною сіллю, гіпсом тощо. Різновидом поверхневих рухів вважатимуться техногенні рухи, викликані діяльністю людини. Наприклад, просідання поверхні шару ґрунту внаслідок відкачування ґрунтових вод, просідання покрівлі гірських виробок, занурення земної поверхні у районі великих міст тощо. Глибинні рухи виявляються у межах астеносфери і літосфери. Надглибинні рухи творяться у низах мантиї, очевидно, в шарі D. Можливими причинами їх виникненню вважаються процеси диференціації мантиї з її важких залізовмісних сполук, «стікаючих» в ядро Землі. Планетарні рухи охоплюють планету загалом. Зародження їх відбувається у земному ядрі, а можливою причиною слід розглядати зміна обсягу ядра отже, і земної кулі з допомогою диференціації речовини Землі. Очевидно, відбитком планетарних рухів на земній поверхні є підняття чи опускання найбільших блоків літосфери загалом. Планетарні рухи найменш вивчені і тому їх дослідження багато в чому є проблематичним. Всі вони, в свою чергу, поділяються на складчасті, блокові, брилові та інші.

3. Згідно загальновизнаних положень геотектоніки, за характером (кінематикою) рухи поділяються на коливальні (або їх ще називають епейрогенічні), коливально-хвильові, регматичні і дислокаційні. В свою чергу дислокаційні рухи підрозділяються на складко утворюючі і розрив утворюючі.

Коливальні рухи земної кори ще називають епейрогенічними. Коливні рухи – це переважно вертикальні рухи, які проявляються у вертикальних підняттях і опусканнях певних ділянок земної кори. Вони відбуваються нині і відбувалися в усі попередні епохи геологічної історії Землі. Особливістю їх є коливний характер, тобто можлива зміна знаку рухів, коли підняття змінюються опусканням і навпаки.

4. За часом проявлення коливні рухи поділяють на сучасні, неотектонічні і стародавні, або коливні рухи минулих геологічних епох. На коливальні рухи накладаються коливально-хвильові, які проявляються частіше і характеризуються тим, що по материках ніби проходять хвилі: в одних місцях земна кора підіймається, в інших – опускається. Тиск переміщених мас мантийної речовини та космічні сили призводять до так званих регматичних рухів, які відбуваються разом з коливально-хвильовими, але відрізняються тим, що рухаються великі блоки земної кори по глибинних розломах – тих, що розсікають всю земну кору. З ними пов'язано, як уже зазначалось, зональне поширення магматизму і утворення рудних корисних копалин.

Переважно вертикальні рухи за часом їх прояву поділять на сучасні (ті, які відбуваються тепер), новітні (або молоді, що мали місце в Голоцені, віковий діапазон якого становить 10 000 років) та неотектонічні (час проявлення яких тривав від початку Олігоценової епохи Палеогену до Голоцену, тобто близько 40 млн. років.) [31].

5. По своєму положенню щодо поверхні Землі, рухи поділяють на ендегенні та екзогенні. Ендегенні процеси протікають в умовах високих температур і тисків. Гравітаційне поле Землі і сили обертання можуть впливати на форму планети, викликати вертикальні і горизонтальні переміщення фрагментів літосфери різної щільності, процеси діапіризму. Під ендегенними рельєф утворюючими факторами розуміються процеси, обумовлені внутрішнім розвитком літосфери і нерівності земної поверхні [31].

Джерела енергії ендегенних процесів поділяють на зовнішні (космічні) та внутрішні (земні). За своїм впливом на земну поверхню ендегенні фактори поділяються на статичні (літолого-стратиграфічні умови і глибина денудаційного зрізу) та динамічні (динаміка визначається напрямком, швидкістю і нерівномірністю рухів у просторі і часі) [1].

Існує декілька класифікацій РЗК. Зокрема, в дослідженні [2] автор виділяє лише два види екзогенних факторів: погодні умови та ерозія (Рис. 1.11).

В іншому дослідженні [3] автор дає детальний поділ виключно екзогенних факторів (Рис. 1.12). Автор наголошує, що усі рухи або всередині Землі, або на поверхні Землі відбуваються через градієнти – від більш високих до нижчих рівнів, від високого до низького тиску тощо.

Екзогенні сили отримують свою енергію з атмосфери, визначеної кінцевою енергією сонця, а також градієнтом, створеним тектонічними факторами. У багатьох статтях йшла мова про те, що схили на земній поверхні створюються в основному тектонічними факторами або рухом землі завдяки ендегенним силам.

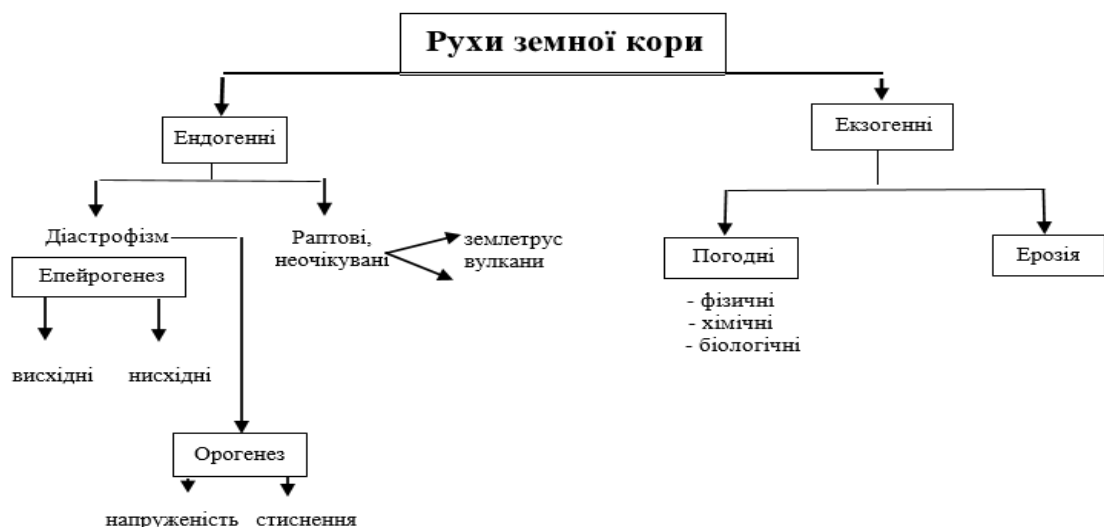


Рис. 1.11 – Класифікація рухів земної кори, запропонована Tiwari P [2]

В іншому дослідженні [3] автор дає детальний поділ виключно екзогенних факторів (Рис. 1.13). Автор статті наголошує, що усі рухи або всередині Землі, або на поверхні Землі відбуваються через градієнти – від більш високих до нижчих рівнів, від високого до низького тиску тощо.

Екзогенні сили отримують свою енергію з атмосфери, визначеної кінцевою енергією сонця, а також градієнтом, створеним тектонічними факторами. У багатьох статтях йшла мова про те, що схили на земній поверхні створюються в основному тектонічними факторами або рухом землі завдяки ендегенним силам.

Відомо, що сила, прикладена на одиницю площі, називається напругою. Стрес виробляється в твердому тілі шляхом натискання або потягування.

Гравітаційна сила діє на всі земляні матеріали, що мають похилу поверхню і має тенденцію виробляти рух речовини в напрямку вниз. Це створює напругу і викликає деформацію частинок.



Рис. 1.12 – Класифікація екзогенних факторів, які впливають на рухи земної кори, запропонована Geography Notes [3]

Можна визначити механічний розпад та хімічний розпад гірських порід через дії різних елементів погоди та клімату.

Коли гірські породи піддаються вивітрюванню, деякі мінерали видаляються за допомогою хімічного / фізичного вилугування ґрунтовими водами і тим самим збільшується концентрація інших (цінних) мінералів.

Вивітрювання можна класифікувати як – фізичне, хімічне та біологічне.

Фізичні або механічні процеси вивітрювання залежать від деяких застосованих сил. Застосовувані сили можуть бути: гравітаційними силами, такими як тиск перевантаження, навантаження та напруга зсуву; сила розширення за рахунок зміни температури, росту кристалів або активності тварин; тиск води, що контролюється циклами змочування та сушіння.

Більшість фізичних вивітрювань спричинені тепловим розширенням і тиском. Усунення таких процесів породи через тривалу ерозію спричиняє вертикальний випуск тиску.

Таким чином, верхні шари решти, що залишилася, розширюються для отримання дезінтеграції гірських мас.

На ділянках вигнутих ґрунтових поверхонь дугоподібні переломи, як правило, утворюють масивні листи або відшаровувані плити.

Отже, вивантаження та розширення створюють великі, гладкі закруглені куполи, які називаються відшаровуючими куполами, рис. 1.13.



Рис. 1.13 – Відшаровуючі куполи на ґрунтових поверхнях

З підвищенням температури кожен мінерал розширюється і відштовхується від свого сусіда, і коли температура падає, відбувається відповідне скорочення.

Завдяки диференційованому нагріванню і внаслідок цього розширенню та стискуванню поверхневих шарів та їх подальшому відшаровуванню від поверхні утворюються гладкі округлі поверхні в гірських породах.

У гірських порід, як граніти, внаслідок такого відшаровування утворюються гладкі поверхні і округлі дрібні до великі валуни, звані торами.

Цикли замерзання та відтавання (погода стає теплішою і спричиняє танення снігу та льоду) спричиняє морозне вивітрювання. Він найбільш ефективний на високих висотах середньої широти, де часто повторюються замерзання та плавлення.

Солі в гірських породах розширюються завдяки термічній дії, гідратації та кристалізації. Багато солей, таких як кальцій, натрій, магній, калій і барій мають тенденцію до розширення. Розширення залежить від температури та їх теплових властивостей. Високі температури коливаються в межах 30-50 ° C поверхневої температури в пустелі, сприятливі для такого розширення солі.

Кристалізація солі є найбільш ефективною з усіх процесів вивітрювання солі. Він надає перевагу в умовах альтернативних умов змочування та висихання.

Останній є ерозія та осадження. Ерозія – це придбання та транспортування кам'яних уламків геоморфними агентами, такими як проточна вода, вітер, хвилі тощо.

Хоча вивітрювання сприяє ерозії, це не є необхідною умовою виникнення ерозії. Відкладення є наслідком ерозії. Ерозійні агенти втрачають свою швидкість і енергію на пологих схилах, і матеріали, що переносяться ними, починають осідати.

В дослідженні [27, 28] запропоновані раніше класифікації [2] та [3] рухів земної кори по своєму положенні щодо поверхні землі у вигляді рисунку 1.14.



Рис. 1.14 – Класифікація рухів земної кори по своєму положенні щодо поверхні землі, запропонована [2] та [3]

Як видно з аналізу рисунка 1.8, осадкоутворення та ерозія можуть впливати лише на рухи земної поверхні. Їхній вплив на рухи земної кори не буде істотним та значущим. Але у випадку, якщо вони носять довготривалий характер, тоді можна говорити про їхній вплив саме на земну кору. Такий екзогенний фактор як зміна тиску та льодовикова активність можуть суттєво впливати на рухи земної кори. Тому, в основному, найістотніший вплив на рухи земної кори роблять саме ендогенні фактори. Ще одну класифікацію рухів земної кори запропонували В.Ю. Хаїн та В.В. Білоусов (Таблиця 1.7). В роботі [4] наведена класифікація рухів земної кори щодо даних науковців.

Таблиця 1.3 – Класифікація РЗК, запропонована В.Ю. Хаїним та В.В. Білоусовим [31]

За В.Ю. Хаїним [5]				За В.В. Білоусовим [6]	
1		2		3	
Суттєво вертикальні рухи		Суттєво горизонтальні рухи		Внутрішньокорові рухи	
Поверхневі (покривні)					
Складчасті (нагнітання)	Блокові	Складчасті (загального зім'яття, ковзання)	Зсуви, насуні, шаряжі	Складчасті (брилові, нагнітання, глибинні)	Розривні (скиди, підкиди, насуні та інші)
1		2		3	
Корові				Загальнокорові	
Складчасті (огортаючі)	Блокові	Складчасті	Зсуви, регіональні зсуви	Колісні (загальні, хвильові)	Розривні (глибинні розломи, зсуви, підкиди та інші)
Глибинні					
Хвильові	Брилові	Хвильові	Глибинні зсуви та насуні		

Більш розширеною і детальною є класифікація рухів земної кори, зібрана і писана автором [7]. На підставі аналізу літературних джерел, можна узагальнити і виокремити такі види РЗК [31]:

- 1) епейрогенічні і орогенічні (за Г.К. Гілбертом, 1890 р. і Г. Штілле, 1913);
- 2) коливальні, складчасті, розривні і магматичні (М.М. Тетяєв, В.В. Білоусов);
- 3) вертикальні (радіальні) й горизонтальні (тангенціальні);
- 4) поверхневі (верхньокорові), корові (загальнокорові), глибинні й надглибинні (верхньо- і загальномантіїні (В.Ю. Хаїн);
- 5) внутрішньокорові, загальнокорові, внутрішньомантіїні і наскрізні корово-мантіїні (В.В. Білоусов);
- 6) коливальні і спрямовані або коротко- і довгоперіодичні;
- 7) інтенсивні й слабкі;
- 8) повільні й швидкі або стрибкоподібні;
- 9) сучасні, молоді (голоценові), новітні (неоген-антропогенові) і стародавні (до-неогенові) [31].

Досин С.І [8] у своїх наукових працях привела власну класифікацію факторів, які впливають на рухи земної поверхні, рис. 1.15.

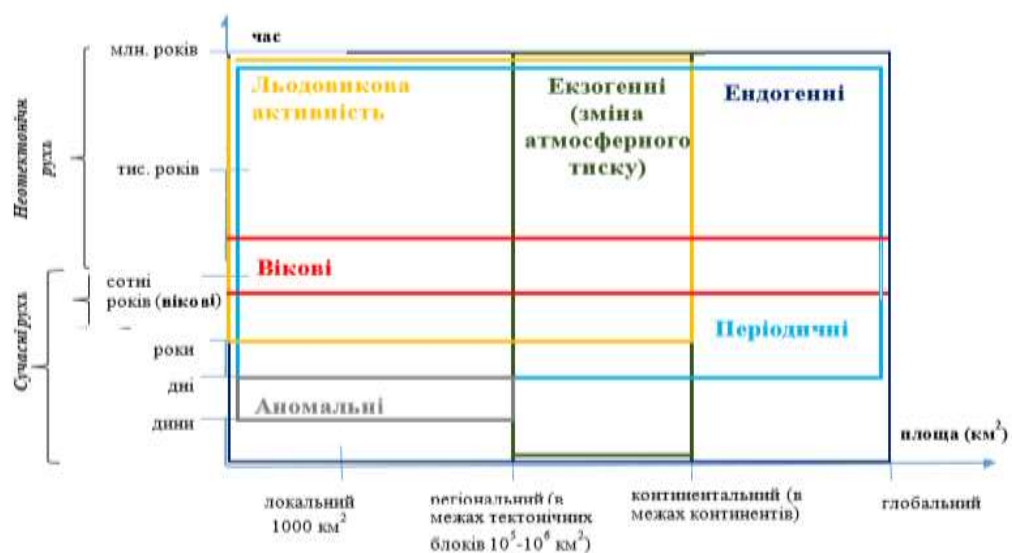


Рис. 1.15 – Класифікація факторів, які впливають на рухи земної поверхні

Об'єктом бакалаврської роботи є рухи земної поверхні, тому потрібно визначити найоптимальніші методи та проаналізувати вертикальні і горизонтальні рухи земної поверхні.

1.3 Супутникові навігаційні системи як інструмент геодинамічного моніторингу

Розвиток глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) відкрив нові можливості для дослідження сучасних рухів земної кори. На відміну від традиційних геодезичних методів, супутникові технології забезпечують безперервний моніторинг координат пунктів спостережень з міліметровою точністю.

До основних глобальних навігаційних систем належать:

- GPS (США);
- GLONASS (Росія);
- Galileo (Європейський Союз);
- BeiDou (Китай).

Одночасне використання сигналів декількох супутникових систем дозволяє підвищити точність визначення координат та надійність результатів спостережень.

Принцип визначення координат базується на вимірюванні відстаней від приймача до супутників за часом проходження радіосигналу. Координати приймача визначаються методом просторової засічки на основі вимірюваних псевдовідстаней або фазових вимірювань.

1.4 Постійно діючі GNSS-мережі України

Для дослідження сучасних деформацій земної кори використовуються мережі постійно діючих референцних станцій. Такі станції безперервно здійснюють прийом сигналів навігаційних супутників і накопичують великі масиви спостережень.

В Україні найбільш поширеними є:

- мережа GeoTerrace;
- мережа System.NET;
- мережа ZAKPOS;
- мережа UA-EUPOS;
- міжнародні станції мережі EPN (European Permanent Network).

Постійні GNSS-станції обладнані високоточними двочастотними або багаточастотними приймачами та антенами, що забезпечують можливість виконання високоточних геодинамічних досліджень.

Основними перевагами використання постійних станцій є:

- безперервність спостережень;
- висока точність визначення координат;
- можливість отримання довготривалих часових рядів;
- автоматизована обробка даних;
- оперативне виявлення деформацій.

1.4. Методи обробки GNSS-спостережень

Обробка даних постійних GNSS-спостережень включає комплекс процедур, спрямованих на визначення координат станцій та їх змін у часі.

Основними етапами обробки є:

1. Збір первинних спостережень.
2. Контроль якості вимірювань.
3. Формування базових ліній.
4. Зрівнювання мережі.
5. Аналіз часових рядів координат.
6. Визначення швидкостей переміщення станцій.

При обробці використовуються міжнародні системи координат:

- ITRF (International Terrestrial Reference Frame);
- ETRF (European Terrestrial Reference Frame).

Для високоточної обробки застосовуються спеціалізовані програмні комплекси:

- Bernese GNSS Software;
- GAMIT/GLOBK;
- GipsyX;
- Trimble Business Center;
- Leica Infinity.

1.5 Визначення горизонтальних рухів земної кори

Горизонтальні рухи визначаються шляхом аналізу зміни координат пунктів у площині XY.

Швидкість горизонтального переміщення обчислюється за формулою:

де:

- V_h – горизонтальна швидкість;
- V_x – швидкість зміни координати X;
- V_y – швидкість зміни координати Y.

Для наочного представлення результатів будуються карти векторів швидкостей, які демонструють напрямок та величину зміщень окремих станцій.

Аналіз горизонтальних швидкостей дозволяє:

- виявляти активні тектонічні зони;
- досліджувати деформації літосферних блоків;
- оцінювати вплив регіональних геодинамічних процесів.

1.6. Визначення вертикальних рухів земної кори

Сучасні рухи земної кори є безперервним процесом зміни просторового положення окремих ділянок земної поверхні під впливом внутрішніх та зовнішніх геодинамічних факторів. Їх вивчення має важливе значення для геодезії, геології, геофізики, будівництва та моніторингу природних небезпек.

Визначення параметрів сучасних рухів земної кори дозволяє оцінювати рівень геодинамічної активності територій, прогнозувати деформаційні процеси та забезпечувати стабільність геодезичних координатних систем.

За характером переміщень розрізняють абсолютні та відносні вертикальні рухи земної кори. Абсолютними вертикальними рухами вважають переміщення пунктів земної поверхні відносно геоцентричної системи координат. Вони визначаються як проекція просторового вектора зміщення точки на напрям прямовисної лінії або нормалі до поверхні референц-еліпсоїда. Однак через постійне уточнення параметрів геоцентричних систем координат та наявність похибок їх реалізації практичне визначення абсолютних рухів є складним завданням.

У більшості геодезичних досліджень визначаються відносні вертикальні рухи, які характеризують зміну висотного положення одного пункту відносно іншого, прийнятого за умовно нерухомий. Для цього виконуються повторні цикли геодезичних спостережень через певні проміжки часу. Навіть визначення рухів відносно поверхні геоїда не є абсолютно незалежним, оскільки сама поверхня геоїда змінюється під впливом перерозподілу мас у надрах Землі.

Для дослідження вертикальних рухів земної кори традиційно застосовуються високоточне геометричне нівелювання, нахиломірні спостереження, мареографічні вимірювання, а також сучасні супутникові технології GNSS. Кожен із цих методів характеризується певними перевагами та обмеженнями щодо точності, просторового охоплення та періодичності отримання результатів.

На перший погляд земна поверхня здається стабільною та нерухомою. Проте в дійсності літосфера перебуває у постійному русі. Більшість цих переміщень відбувається надзвичайно повільно і стає помітною лише за результатами тривалих геодезичних спостережень. В окремих випадках рухи земної кори проявляються у вигляді катастрофічних явищ, таких як землетруси, вулканічна діяльність, зсуви або просідання земної поверхні.

Головною причиною тектонічних рухів є процеси, що відбуваються у мантиї Землі. Переміщення мантийної речовини зумовлюється внутрішнім теплом планети, яке виникає внаслідок радіоактивного розпаду елементів та залишкової енергії формування Землі. Конвекційні потоки в мантиї спричиняють переміщення літосферних плит, що, у свою чергу, викликає деформації та переміщення земної кори.

Залежно від характеру деформацій виділяють три основні типи рухів земної кори: коливальні, розривні та складкоутворюючі.

Коливальні рухи являють собою повільні вертикальні переміщення значних ділянок земної кори без суттєвого порушення структури гірських порід. Вони проявляються у вигляді підняття або опускання великих територій і можуть тривати протягом мільйонів років. Такі процеси є однією з причин трансгресій і регресій морів, формування рівнинних територій та зміни берегових ліній. У сучасну геологічну епоху прикладами підняття територій є Скандинавський півострів та Ісландія, тоді як окремі райони Нідерландів, Великої Британії та Причорноморської низовини характеризуються поступовим опусканням.

Коливальні рухи не супроводжуються значними структурними перетвореннями земної кори, однак суттєво впливають на процеси накопичення осадових порід, інтенсивність ерозійних процесів та формування сучасного рельєфу. Особливе значення мають новітні рухи земної кори, які розпочалися в неогеновий період і продовжуються донині, формуючи сучасний вигляд земної поверхні.

Розривні рухи виникають у випадках, коли напруження в земній корі перевищують міцність гірських порід. У результаті відбувається утворення розломів та зміщення окремих блоків кори відносно один одного. Опущені блоки називають грабенами, а підняті — горстами. Такі структури широко поширені в гірських районах та зонах активної тектоніки. Розривні деформації часто супроводжуються сейсмічними процесами та є причиною формування багатьох сучасних гірських систем і міжгірських западин.

Складкоутворюючі рухи виникають під дією горизонтальних стискальних сил у пластичних товщах гірських порід. У результаті шари порід деформуються та утворюють складки різної форми й розмірів. Саме складкоутворення стало основою формування багатьох молодих гірських систем світу, зокрема Альп, Карпат, Кавказу, Гімалаїв та Анд. Ці процеси відіграють визначальну роль у розвитку сучасної тектонічної будови континентів.

Таким чином, рухи земної кори є результатом складної взаємодії внутрішніх геодинамічних процесів Землі. Їх дослідження дозволяє не лише встановлювати закономірності розвитку геологічних структур, але й забезпечувати високоточне геодезичне супроводження територій, що є особливо важливим для створення сучасних координатних систем та моніторингу деформацій земної поверхні.

Вертикальні рухи характеризують процеси підняття або опускання земної поверхні.

Вертикальна швидкість визначається за формулою:

де:

- V_z – швидкість вертикального зміщення;
- ΔZ – зміна висоти;
- Δt – інтервал часу.

Вертикальні переміщення можуть бути пов'язані з:

- сучасними тектонічними процесами;
- просіданням ґрунтів;
- гірничими роботами;
- зміною рівня підземних вод;
- карстовими процесами.

На території України найбільші вертикальні рухи спостерігаються у Карпатському регіоні, Криворізькому залізорудному басейні, Донбасі та Причорномор'ї.

1.7. Аналіз часових рядів координат GNSS-станцій

Для визначення швидкостей сучасних рухів земної кори використовуються часові ряди координат, отримані за результатами багаторічних спостережень.

Часовий ряд являє собою послідовність координат станції:

$X(t), Y(t), Z(t)$

визначених у різні моменти часу.

На основі часових рядів виконується:

- оцінка стабільності станцій;
- визначення швидкостей зміщення;
- виявлення сезонних коливань;
- аналіз аномальних змін координат.

Для апроксимації часових рядів найчастіше використовується лінійна модель:

де:

- X_0, Y_0, Z_0 – початкове значення координати;
- V_x, V_y, V_z – швидкість зміщення;
- t – час спостережень.

ВИСНОВОК ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ

У першому розділі розглянуто теоретичні основи дослідження сучасних горизонтальних і вертикальних рухів земної кори за даними постійних GNSS-спостережень. Встановлено, що використання мереж GeoTerrace та System.NET забезпечує отримання високоточних координат пунктів спостережень та дозволяє визначати швидкості сучасних геодинамічних процесів на території України. Проаналізовано принципи функціонування GNSS-технологій, особливості постійно діючих референцних станцій, методи обробки супутникових спостережень і способи визначення горизонтальних та вертикальних зміщень земної поверхні. Отримані теоретичні положення є основою для виконання подальших досліджень та аналізу результатів GNSS-моніторингу в наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ТА ВЕРТИКАЛЬНИХ РУХІВ ЗЕМНОЇ КОРИ

2.1 Загальна характеристика ГНСС-мереж GeoTerrace та System.NET

Для дослідження сучасних горизонтальних і вертикальних рухів земної кори України використано дані постійно діючих референцних ГНСС-мереж GeoTerrace та System.NET. Дані мережі забезпечують безперервні супутникові спостереження та формують єдине координатно-часове поле на території України.

Мережа GeoTerrace є найбільшою комерційною мережею постійно діючих GNSS-станцій в Україні. Вона охоплює практично всю територію держави та забезпечує отримання високоточних координат у режимах RTK, Network RTK та постпроцесингу. До складу мережі входить понад 200 референцних станцій, обладнаних сучасними багаточастотними приймачами та антенами.

Мережа System.NET функціонує як незалежна система супутникового моніторингу та також включає значну кількість базових станцій, розташованих у різних регіонах України. Станції мереж підтримують спостереження супутникових систем GPS, GLONASS, Galileo та BeiDou.

Використання даних двох незалежних мереж дозволяє:

- підвищити надійність отриманих результатів;
- забезпечити рівномірне покриття території України;
- зменшити вплив локальних деформацій окремих пунктів;
- виконати перевірку отриманих швидкостей зміщень.

Основні характеристики мереж представлено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики мережі

Показник	GeoTerrace	System.NET
Тип мережі	Постійно діюча GNSS-мережа	Постійно діюча GNSS-мережа
Режим роботи	24/7	24/7
Підтримувані системи	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
Формат даних	RINEX	RINEX
Точність координат	1–3 мм	1–3 мм

GeoTerrace є найбільшою комерційною мережею референціальних GNSS-станцій в Україні. Її створення розпочалося у 2006 році з метою забезпечення користувачів високоточними координатами в режимі реального часу.

Станом на сьогодні мережа охоплює всю територію України та включає понад 250 постійно діючих станцій. Більшість пунктів обладнана сучасними двочастотними та багаточастотними GNSS-приймачами Leica, Trimble, Topcon і Septentrio.

Основними функціями мережі є:

- забезпечення RTK-вимірювань;
- підтримка мережових поправок VRS;
- постпроцесинг GNSS-спостережень;
- моніторинг деформацій споруд;
- геодинамічні дослідження;
- створення високоточної координатної основи.

Всі станції працюють у цілодобовому режимі та здійснюють прийом сигналів супутникових систем:

- GPS;
- GLONASS;

- Galileo;
- BeiDou.

Основні функції мережі GeoTerrace

Мережа забезпечує широкий спектр геодезичних та наукових завдань.

1. RTK-позиціонування

Технологія **RTK (Real Time Kinematic)** забезпечує визначення координат у режимі реального часу з точністю:

- 1–2 см у плані;
- 2–3 см по висоті.

RTK широко використовується під час:

- кадастрових робіт;
- топографічних знімів;
- інженерно-геодезичних вишукувань;
- будівництва;
- моніторингу споруд.

Схема функціонування мережі GeoTerrace



Рисунок 2.1 – Схема функціонування мережі GeoTerrace

2. Мережеві поправки VRS

Система формує віртуальну референцну станцію (**VRS – Virtual Reference Station**), яка створюється поблизу користувача.

Переваги технології:

- підвищення точності позиціонування;
- компенсація атмосферних похибок;
- збільшення дальності роботи RTK;
- зменшення впливу іоносферних та тропосферних ефектів.

Архівні дані мережі використовуються для виконання постобробки супутникових вимірювань.

Основні напрями використання:

- створення геодезичних мереж;
- згущення державної геодезичної мережі;
- високоточне визначення координат пунктів;
- наукові дослідження деформацій земної поверхні.

Схема використання мережі для дослідження рухів земної кори

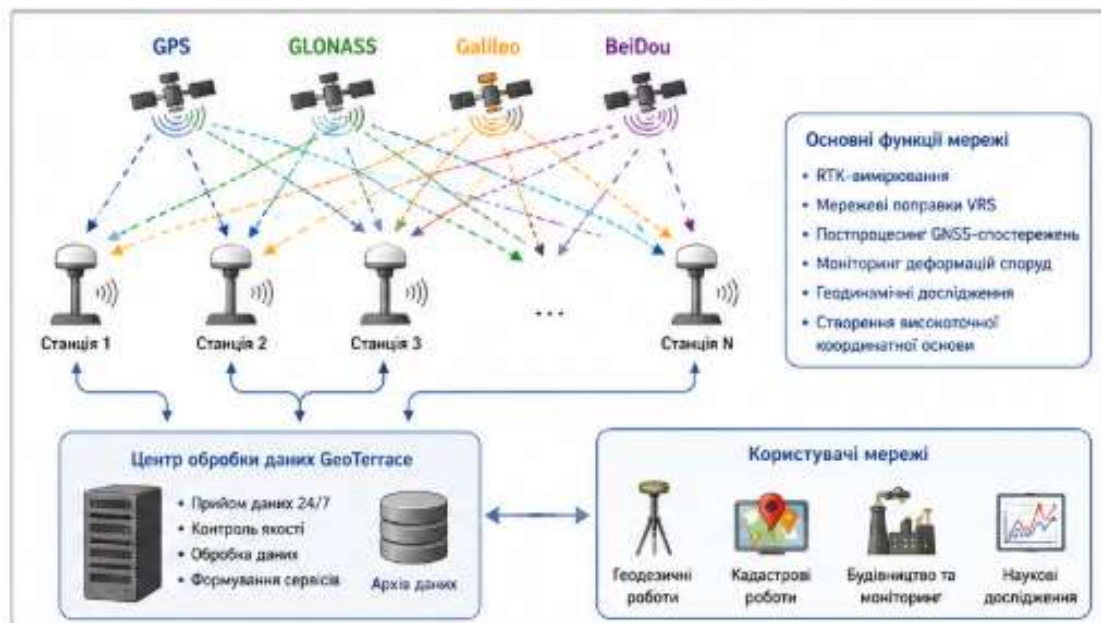


Рисунок 2.2 – Схема використання даних мережі GeoTerrace для визначення сучасних горизонтальних та вертикальних рухів земної кори України

4. Геодинамічний моніторинг

Постійні спостереження дозволяють досліджувати:

- сучасні горизонтальні рухи земної кори;
- вертикальні рухи земної поверхні;
- деформаційні процеси в активних геологічних структурах;
- рух літосферних плит.

Саме ця функція є ключовою для даної дипломної роботи.

5. Моніторинг інженерних споруд

Мережа використовується для контролю деформацій:

- мостів;
- дамб;
- гідротехнічних споруд;
- кар'єрів;
- промислових об'єктів;
- висотних будівель.

6. Формування координатної основи України

Дані мережі застосовуються для:

- підтримки державних систем координат;
- розвитку геодезичної інфраструктури;
- реалізації сучасних референцних систем координат ITRF та ETRF;
- забезпечення єдиного координатного простору України.

Супутникові системи, що використовуються в мережі

Усі референцні станції працюють цілодобово та здійснюють одночасний прийом сигналів від декількох глобальних навігаційних супутникових систем.

GPS (США)

Характеристики:

- понад 30 супутників;
- глобальне покриття;
- основна система для більшості GNSS-вимірювань.

Galileo (ЄС)

Переваги:

- висока точність навігаційних визначень;

- сучасна структура сигналів;
- ефективна робота в умовах міської забудови.

BeiDou (Китай)

Особливості:

- швидко зростаюче супутникове угруповання;
- покращення доступності супутників;
- підвищення надійності координатних рішень.

На **рисунку 2.3** наведено архітектуру типової референційної GNSS-станції мережі GeoTerrace. Основними складовими станції є геодезична антена, високоточний GNSS-приймач, комунікаційне обладнання та система безперебійного живлення.



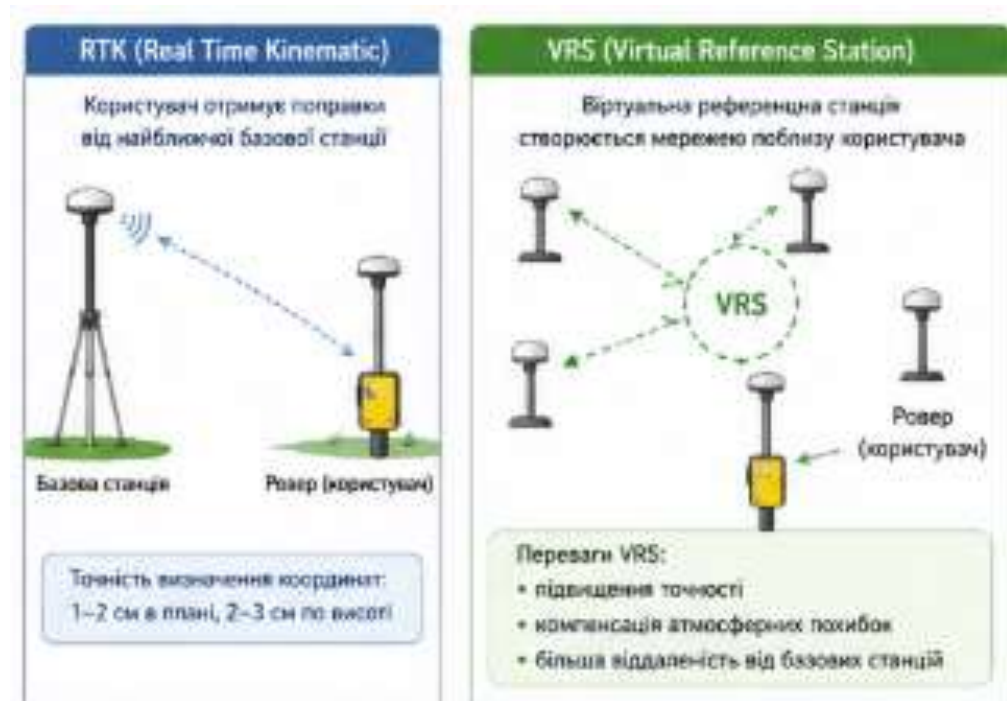
Рисунок 2.3 демонструє принципову схему функціонування окремої референційної станції та передачі супутникових даних до центру обробки мережі GeoTerrace.

Геодезична антена забезпечує безперервний прийом супутникових сигналів від навігаційних систем GPS, GLONASS, Galileo та BeiDou. Отримані

сигнали надходять до GNSS-приймача, який виконує їх декодування, первинну обробку та формування файлів спостережень. Через мережу Інтернет або VPN-з'єднання дані передаються до центрального сервера обробки мережі GeoTerrace, де здійснюється їх архівація, контроль якості та подальша обробка.

Важливим елементом станції є система резервного живлення, яка забезпечує безперервність функціонування обладнання навіть у випадку перебоїв електропостачання. Завдяки цілодобовій роботі референцних станцій створюється надійна координатна основа для виконання високоточних геодезичних робіт та дослідження сучасних рухів земної кори.

На **рисунку 2.4** представлено дві основні технології високоточного супутникового позиціонування, які використовуються в мережі GeoTerrace: **RTK (Real Time Kinematic)** та **VRS (Virtual Reference Station)**.



Технологія RTK базується на передачі диференціальних поправок від найближчої базової станції безпосередньо до приймача користувача (ровера). У результаті забезпечується визначення координат у режимі реального часу з точністю до 1–2 см у плановому положенні та 2–3 см за висотою. Основним обмеженням RTK є зниження точності зі збільшенням відстані між базовою станцією та ровером.

Для усунення цього недоліку застосовується технологія VRS. У цьому випадку мережа референцних станцій формує віртуальну базову станцію поблизу місця розташування користувача. Це дозволяє значно зменшити вплив атмосферних похибок, підвищити точність координатних визначень та забезпечити стабільність результатів на значних відстанях від реальних базових станцій.

Таким чином, **рисунок 2.4 ілюструє принцип роботи технологій RTK та VRS, що використовуються для отримання високоточних координат і є основою сучасних геодезичних вимірювань та геодинамічних досліджень.**

Представлені схеми демонструють технічну основу функціонування мережі GeoTerrace. Поєднання сучасних референцних станцій, централізованої системи обробки даних та технологій RTK/VRS забезпечує отримання координат із сантиметровою точністю, що є необхідною умовою для визначення горизонтальних і вертикальних рухів земної кори на території України.

2.2 Вихідні дані дослідження та критерії відбору ГНСС-станцій

Основою дослідження стали добові файли спостережень у форматі RINEX, отримані з архівів мереж GeoTerrace та System.NET.

Для забезпечення достовірності оцінки швидкостей сучасних рухів земної кори до аналізу включалися лише станції, які відповідали таким критеріям:

- тривалість спостережень не менше 3 років;
- безперервність часових рядів;
- відсутність значних апаратних змін;
- стабільність антенно-приймального комплексу;
- відсутність впливу локальних деформацій основи станції.

Для кожної станції використовувалися координати у міжнародній системі ITRF2020.

У результаті було сформовано вибірку постійно діючих станцій, рівномірно розташованих на території України.

Для дослідження сучасних горизонтальних та вертикальних рухів земної кори на території України були використані матеріали постійних ГНСС-спостережень мереж **GeoTerrace** та **System.NET**, які є найбільшими комерційними мережами референтних станцій в Україні. Дані цих мереж забезпечують безперервний моніторинг координат пунктів та дозволяють виконувати високоточні геодинамічні дослідження.

Основним джерелом вихідної інформації стали добові файли спостережень у міжнародному форматі **RINEX (Receiver Independent Exchange Format)**. Даний формат є загальноприйнятим стандартом для обміну GNSS-даними між різними програмними комплексами та приймачами різних виробників.

Файли спостережень містять інформацію про:

- псевдовідстані до супутників;
- фазові вимірювання несучих частот;
- доплерівські вимірювання;
- рівень сигналу супутників;
- навігаційні повідомлення;
- службову інформацію про приймач та антену.

Завдяки багаторічному архівуванню даних мережами GeoTerrace та System.NET стало можливим формування тривалих часових рядів координат для аналізу сучасних геодинамічних процесів.

Критерії відбору ГНСС-станцій

Оскільки визначення швидкостей сучасних рухів земної кори вимагає високої надійності координатних рядів, до аналізу були включені лише ті станції, які відповідали низці критеріїв якості.

Тривалість спостережень

Одним із головних критеріїв стала тривалість безперервних спостережень.

До вибірки включалися станції, для яких доступний архів даних не менше ніж за три роки.

Тривалі часові ряди дозволяють:

- зменшити вплив випадкових похибок;
- відокремити сезонні коливання;
- отримати статистично надійні оцінки швидкостей зміщень.

Безперервність часових рядів

Важливою умовою була відсутність значних прогалин у спостереженнях.

Станції з великими перервами в роботі можуть призводити до спотворення результатів оцінки швидкостей переміщень.

Допускалися лише короткочасні технічні зупинки, пов'язані з:

- оновленням обладнання;
- ремонтними роботами;
- відключенням електроживлення.

Стабільність обладнання

Особливу увагу приділяли стабільності антенно-приймального комплексу.

До аналізу включалися лише станції, на яких:

- не проводилися часті заміни приймачів;
- не змінювався тип антени;
- не відбувалося зміщення антени відносно вихідного центру.

Подібні зміни можуть викликати стрибки координат, які не пов'язані з реальними рухами земної кори.

Відсутність локальних деформацій

Для геодинамічних досліджень важливо, щоб зміщення станції відображали рухи земної кори, а не локальні інженерні процеси.

Тому виключалися станції, розташовані:

- на будівлях із деформаціями фундаментів;
- на промислових об'єктах;

- поблизу кар'єрів;
- в районах активного будівництва.

Перевага надавалася станціям, встановленим на монолітних бетонних основах або спеціальних геодезичних пілонах.

Просторове розміщення станцій

Для забезпечення репрезентативності дослідження було сформовано вибірку станцій, які рівномірно охоплюють територію України.

До вибірки увійшли станції:

- Західної України;
- Центральної України;
- Північної України;
- Південної України;
- Східної України.

Такий підхід дозволив дослідити регіональні особливості сучасних деформацій земної кори.



Рисунок 2.5 – Схема критеріїв відбору ГНСС-станцій

На рисунку наведено основні критерії відбору станцій для геодинамічного аналізу. Дотримання цих вимог забезпечує високу якість часових рядів координат та мінімізує вплив негеодинамічних факторів на результати визначення швидкостей рухів земної кори.



Рисунок 2.6 – Структура вихідних даних дослідження

Рисунок демонструє загальну технологічну схему підготовки вихідних даних. Первинні спостереження, отримані зі станцій GeoTerrace та System.NET, проходять контроль якості та математичну обробку, після чого формуються часові ряди координат. На основі цих рядів визначаються горизонтальні та вертикальні швидкості зміщень пунктів.

Таблиця 2.1 – Основні критерії відбору ГНСС-станцій

Критерій	Вимога
Тривалість спостережень	не менше 3 років
Частота запису	30 с
Безперервність даних	мінімальні пропуски
Стабільність антени	без зміщень
Стабільність приймача	без суттєвих змін
Локальні деформації	відсутні
Координатна система	ITRF2020

У результаті проведеного відбору було сформовано мережу постійно діючих ГНСС-станцій, що забезпечує надійну основу для визначення сучасних горизонтальних і вертикальних рухів земної кори України та подальшого порівняння отриманих результатів із міжнародними геодинамічними моделями ITRF2020 та ETRF2020.

Порядок завантаження файлів GNSS-спостережень

1. Підключення до вебінтерфейсу станції

Відкрити веббраузер та перейти за IP-адресою GNSS-станції:

<http://178.212.105.137:48094/>

Після підключення відкривається вебінтерфейс приймача Trimble.

2. Перехід до архіву спостережень

У лівому меню необхідно обрати:

Data

Logging



Data Files

Після цього відкривається каталог архівних файлів спостережень.

3. Вибір каталогу спостережень

У каталозі відображаються папки за роками та місяцями спостережень.

Наприклад:

Internal

└── 202603

де:

- 2026 — рік спостережень;
- 03 — місяць спостережень.

Необхідно перейти до потрібної папки.



Рис. 2.7 - Порядок завантаження файлів GNSS-спостережень

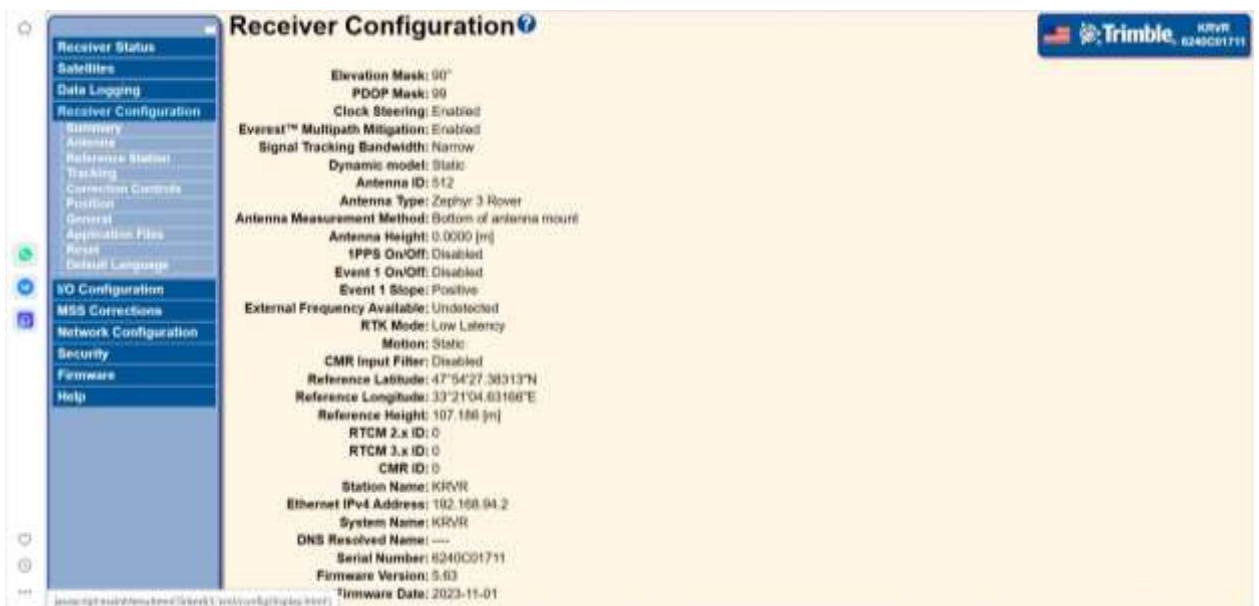


Рис. 2.8 - Порядок завантаження файлів GNSS-спостережень

4. Вибір файлу для завантаження

У списку будуть доступні файли формату:

6240C01711202603310000.T02

6240C01711202603300000.T02

Формат **T02** є внутрішнім бінарним форматом Trimble і містить первинні супутникові вимірювання.

Для подальшої обробки рекомендується конвертувати файл у формат RINEX.

5. Конвертація файлів

Встановити позначку біля необхідного файлу та натиснути кнопку:

Convert and Download Selected Files

Відкриється вікно вибору формату.

На рисунку показано список доступних форматів:

- RINEX 2.11
- RINEX 2.12 w/QZSS
- RINEX 3.00
- RINEX 3.02
- RINEX 3.03
- RINEX 3.04
- BINEX
- Google Earth

Для геодинамічних досліджень та обробки в сучасних програмних пакетах рекомендується обирати:

RINEX 3.04

оскільки він підтримує всі сучасні супутникові системи:

- GPS;
- GLONASS;
- Galileo;
- BeiDou.

6. Вибір типу даних

У полі:

Observables

обираються файли спостережень.

Після цього натискається кнопка:

Convert and Download

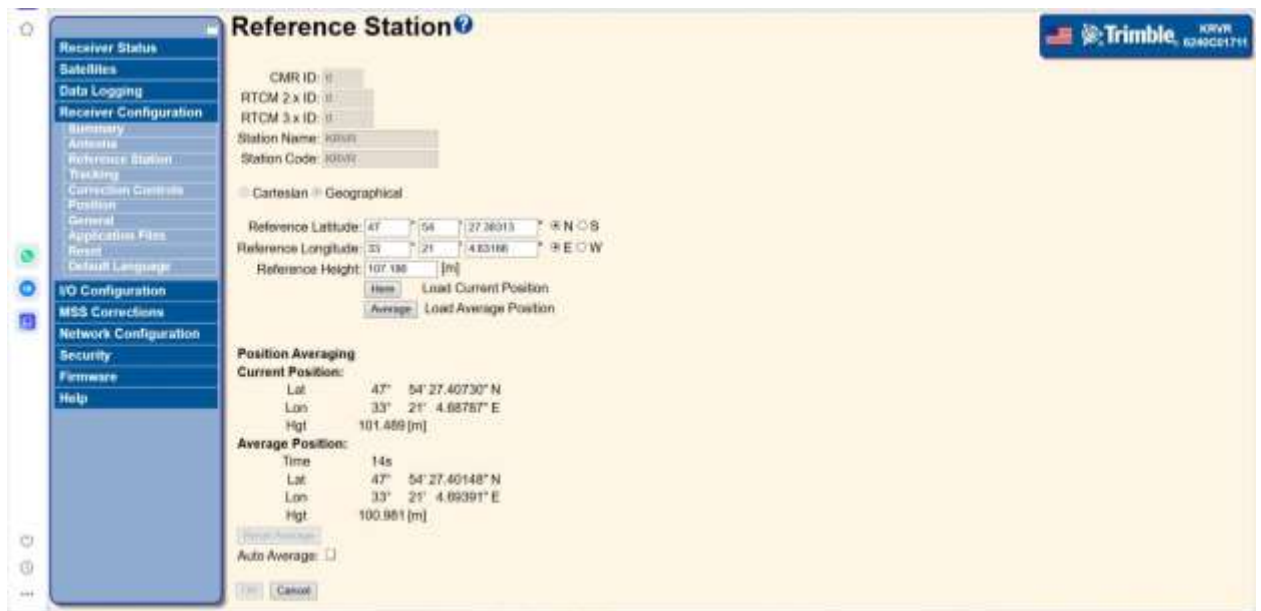


Рис. 2.9 - Порядок завантаження файлів GNSS-спостережень



Рис. 2.10 – Порядок завантаження файлів GNSS-спостережень

6. Вибір типу даних

У полі:

Observables

обираються файли спостережень.

Після цього натискається кнопка:

Convert and Download

7. Завантаження файлу

Після завершення конвертації система автоматично сформує архів або файл формату:

*.obs

або

*.rnx

який буде збережено на локальному комп'ютері.



Рис. 2.11- Порядок завантаження файлів GNSS-спостережень



Рис. 2.12 - Порядок завантаження файлів GNSS-спостережень

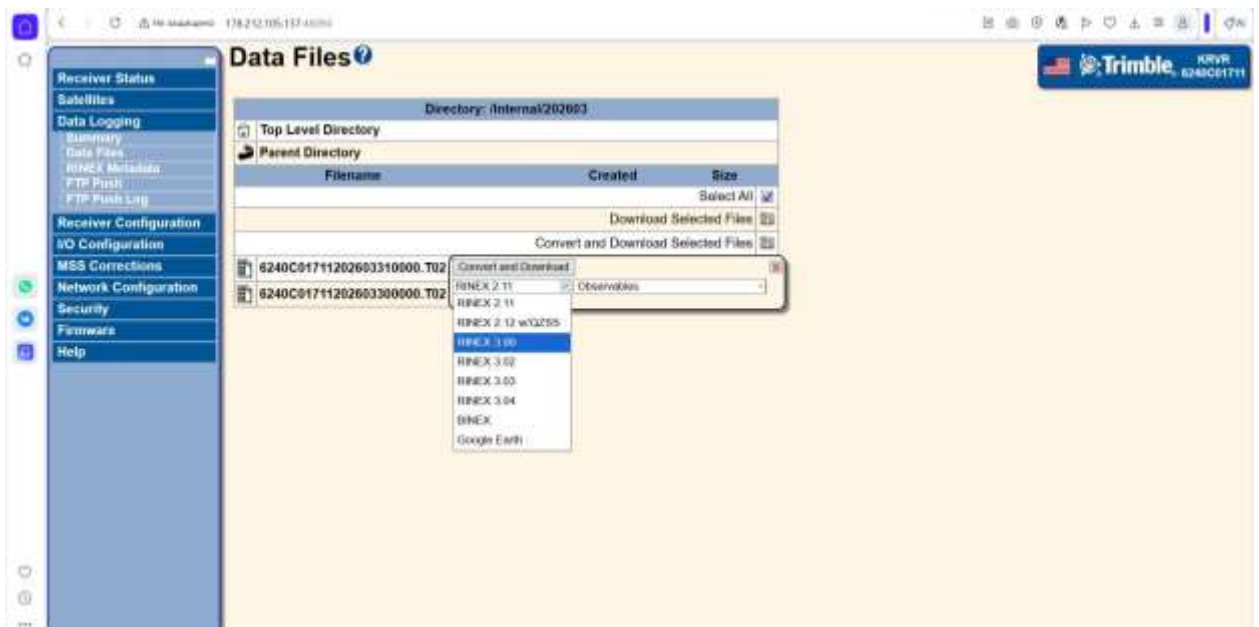


Рис. 2.13 – Порядок завантаження файлів GNSS-спостережень

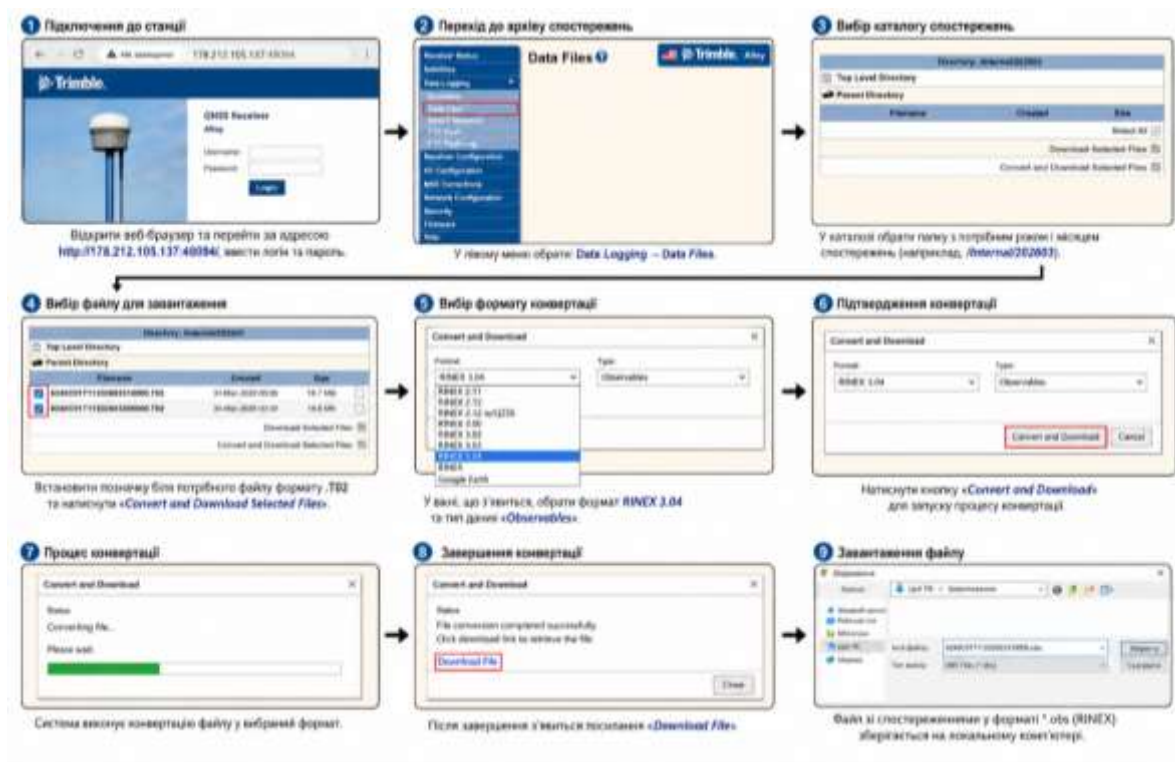


Рисунок 2.5 – Алгоритм отримання GNSS-даних із постійно діючої станції

Кривого Рогу

На рисунку 2.5 наведено послідовність отримання даних супутникових спостережень із вебінтерфейсу постійно діючої GNSS-станції мережі. Первинні файли формату T02 конвертуються у стандартний формат RINEX, який використовується для подальшої наукової та виробничої обробки в програмних комплексах Trimble Business Center, GAMIT/GLOBK, Bernese GNSS Software, GipsyX та RTKLIB. Отримані файли формують основу для створення часових рядів координат і визначення сучасних горизонтальних та вертикальних рухів земної кори України.

2.3 Особливості формування просторово-часових рядів координат

Для визначення швидкостей рухів земної кори необхідно сформувати часові ряди координат кожної станції.

Координати кожного пункту визначаються у прямокутній геоцентричній системі координат:

де:

- X – координата вздовж осі X ;
- Y – координата вздовж осі Y ;
- Z – координата вздовж осі обертання Землі.

Після обробки GNSS-спостережень формується послідовність координат:

$X(t), Y(t), Z(t)$

для кожного моменту часу.

Для аналізу деформацій координати переводяться у локальну топоцентричну систему:

- North (N);
- East (E);
- Up (U).

В результаті отримуються часові ряди:

$N(t), E(t), U(t)$

які використовуються для оцінки горизонтальних та вертикальних переміщень.

Перед подальшим аналізом виконуються:

- усунення грубих похибок;
- фільтрація аномальних значень;
- урахування сезонних коливань;
- перевірка стабільності часових рядів.

2.4 Методика визначення горизонтальних швидкостей зміщень

Горизонтальні переміщення характеризують зміни положення пунктів у напрямках Північ–Південь та Схід–Захід.

Для визначення швидкостей використовується лінійна регресійна модель:

та

де:

- V_N — швидкість зміщення на північ;
- V_E — швидкість зміщення на схід.

Повна горизонтальна швидкість визначається:

Напрямок руху обчислюється:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{V_E}{V_N} \right)$$

Отримані швидкості дозволяють побудувати поле горизонтальних рухів земної кори України.

2.5 Методика визначення вертикальних швидкостей зміщень

Вертикальні рухи визначаються за компонентами U_p (U).

Для кожної станції використовується рівняння:

де:

- U_0 — початкове значення висоти;
- V_U — вертикальна швидкість.

Якщо:

- $VU > 0$ – спостерігається підняття території;
- $VU < 0$ – відбувається опускання території.

Для оцінки достовірності результатів визначаються:

- середньоквадратична помилка;
- довірчий інтервал;
- коефіцієнт детермінації.

За отриманими значеннями створюються карти вертикальних швидкостей рухів земної кори.

2.6 Порівняння результатів із моделлю ITRF-2020 та системою ETRF-2020

Для перевірки достовірності отриманих результатів виконано порівняння з міжнародними референцними системами координат ITRF2020 та ETRF2020.

Система ITRF2020 описує глобальний рух літосферних плит та використовується як міжнародна геодезична основа.

Система ETRF2020 є європейською реалізацією міжнародної системи координат і фіксується відносно Євразійської літосферної плити.

Порівняння виконувалося шляхом аналізу залишкових швидкостей:

$$\Delta V = V_{obs} - V_{model}$$

де:

- V_{obs} — визначена швидкість;
- V_{model} — швидкість за моделлю ITRF2020 або ETRF2020.

Аналіз залишкових швидкостей дозволяє виділити локальні геодинамічні процеси, характерні для території України.

ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ

У другому розділі розроблено методику дослідження сучасних горизонтальних і вертикальних рухів земної кори України на основі даних постійно діючих GNSS-мереж GeoTerrace та System.NET. Визначено критерії відбору референцних станцій, сформовано просторово-часові ряди координат та описано методику оцінювання швидкостей зміщень у горизонтальному і вертикальному напрямках.

Запропонований підхід базується на аналізі багаторічних супутникових спостережень та використанні міжнародних референцних систем ITRF2020 і ETRF2020. Це забезпечує можливість отримання високоточних оцінок сучасних геодинамічних процесів на території України та створює основу для подальшого аналізу результатів, який буде представлено у третьому розділі роботи.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ СУЧАСНИХ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ТА ВЕРТИКАЛЬНИХ РУХІВ ЗЕМНОЇ КОРИ УКРАЇНИ ЗА ДАНИМИ ПОСТІЙНИХ GNSS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ

3.1. Формування часових рядів координат GNSS-станцій

Після відбору станцій мереж GeoTerrace та System.NET було сформовано часові ряди координат у системах ITRF2020 та ETRF2020. Для кожної станції визначалися добові значення просторових координат X, Y, Z та їх проєкції у локальній системі координат:

- північна компонента (North);
- східна компонента (East);
- висотна компонента (Up).

Обробка виконувалася на основі добових файлів RINEX за період 2018–2024 рр. З метою усунення випадкових похибок використовувалися процедури статистичного контролю та фільтрації аномальних вимірювань.

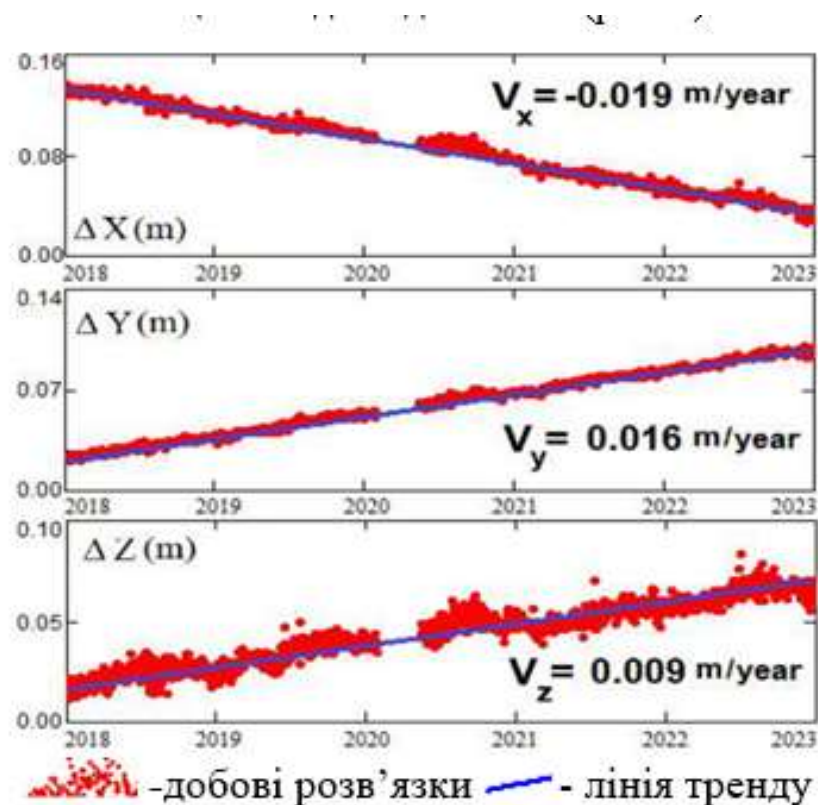


Рис. 3.1 - Схема формування часових рядів координат GNSS-станцій

3.2. Аналіз сучасних вертикальних рухів земної кори України

За результатами обробки встановлено, що поле вертикальних швидкостей на території України є неоднорідним.

Згідно з отриманими даними, значення вертикальних швидкостей змінюються в межах від -3 до $+2$ мм/рік. Для більшості станцій характерні незначні опускання земної поверхні зі середньою швидкістю близько $0,7$ мм/рік.

Найбільш інтенсивні опускання спостерігаються:

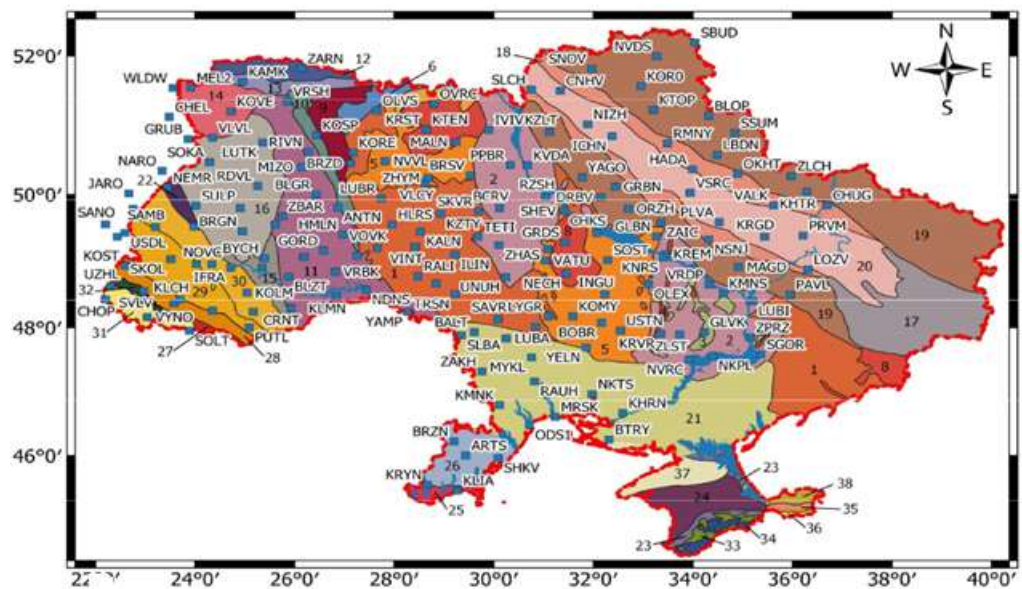
- у межах Переддобруджинського прогину;
- Південноукраїнської монокліналі;
- окремих ділянок Дніпровсько-Донецької западини.

Натомість локальні підняття зафіксовані:

- у Прикарпатті;
- Закарпатті;
- на окремих ділянках Українського щита.

Таблиця 3.1 - Характеристика вертикальних рухів окремих геоструктур України

Геоструктура	Швидкість, мм/рік	Характер руху
Прикарпаття	$+0,5 \dots +1,0$	підняття
Закарпаття	$+0,5$	підняття
Волинсько-Подільська плита	$+0,5 \dots +1,0$	підняття
Дніпровсько-Донецька западина	$-0,5 \dots -1,0$	опускання
Переддобруджинський прогин	$-1,0 \dots -2,0$	опускання
Південноукраїнська монокліналь	$-1,0 \dots -2,0$	опускання



Розташування ГНСС-станцій на тлі тектонічної карти території України
(за матеріалами [Національний атлас України, 2007].)



Рис. 3.2 - Карта сучасних вертикальних рухів земної кори України

3.3. Аналіз горизонтальних рухів земної кори

Результати дослідження показали, що на більшій частині території України горизонтальні рухи мають загальний південно-західний напрямок зі швидкістю 1–2 мм/рік.

Максимальні швидкості зміщень становлять:

- 4,3 мм/рік у напрямку на північ (станція ILIN);
- 3,4 мм/рік у напрямку на південь (станція KMNS);
- 2,9 мм/рік у напрямку на схід (станція SHAZ);
- 3,8 мм/рік у напрямку на захід (станція CNHV).

На території Українського щита простежується поступове збільшення швидкостей від північної до південної частини.

Для Закарпатського прогину характерна складна структура векторного поля, обумовлена активними тектонічними процесами.

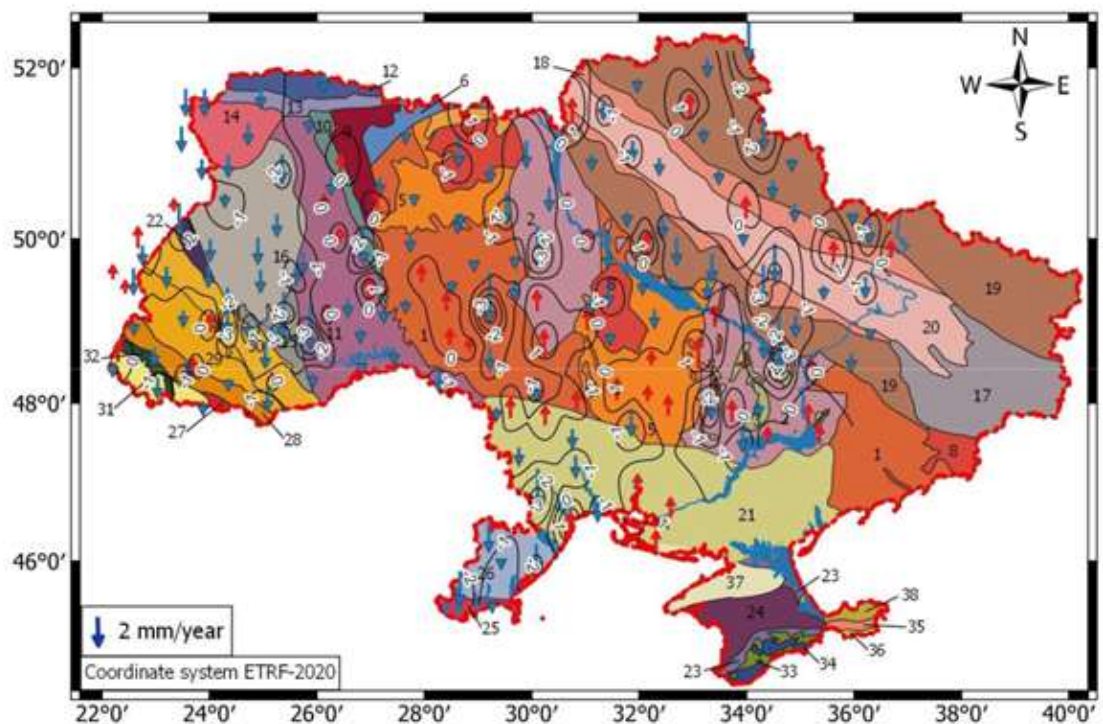


Рис. 3.3 - Векторна модель горизонтальних швидкостей зміщень GNSS-станцій України

3.4. Порівняння результатів з моделлю ITRF2020

Для оцінки достовірності результатів виконано порівняння отриманих швидкостей з модельними значеннями міжнародної референцної системи ITRF2020.

Встановлено, що абсолютні швидкості руху Євразійської плити становлять:

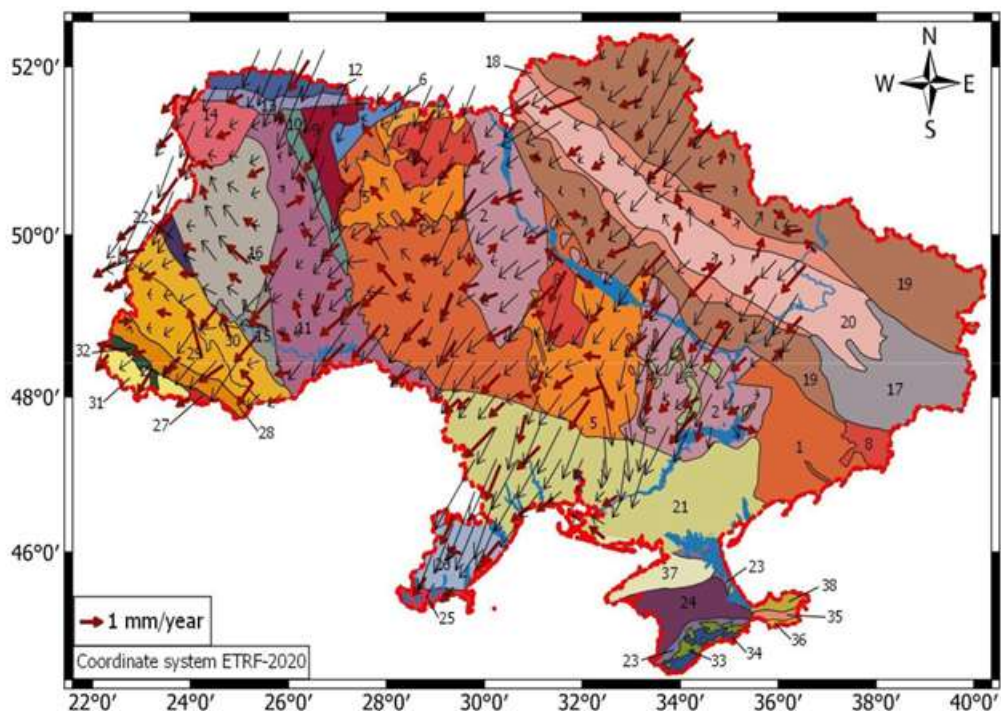
- 21–24 мм/рік у північному напрямку;
- 11–14 мм/рік у східному напрямку.

Після переходу до залишкових швидкостей було визначено регіональні деформації території України.

Для станції KRVR (м. Кривий Ріг) залишкові швидкості становлять:

Станція	VN, мм/рік	VE, мм/рік
KRVR	-0,4	-1,9

Отримані значення підтверджують загальну тенденцію переміщення території України у південно-західному напрямку.



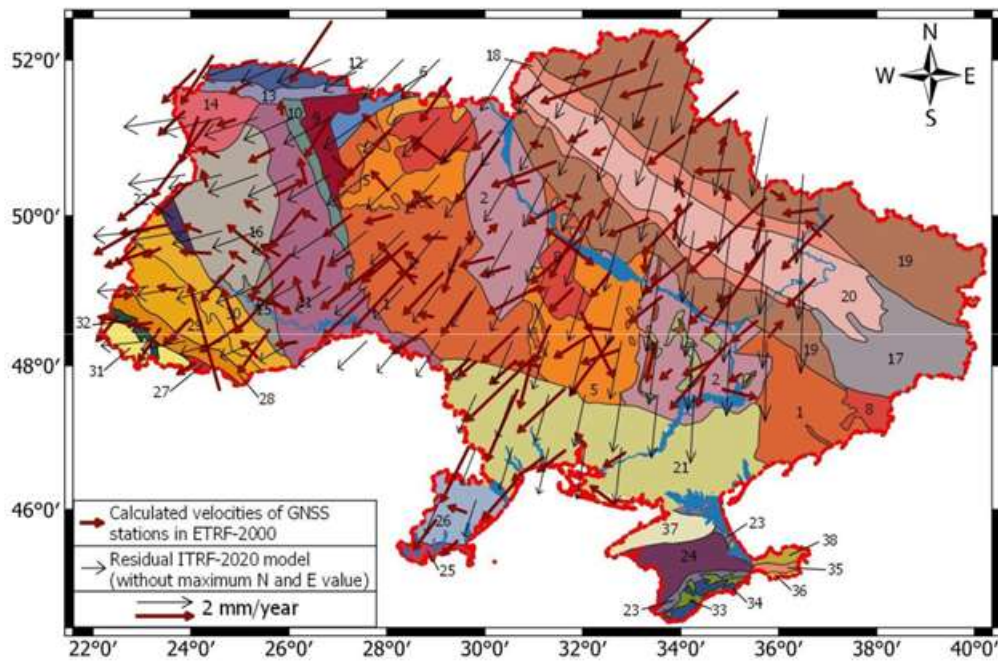


Рис. 3.4 - Порівняння горизонтальних швидкостей у системах ETRF2020 та ITRF2020

3.5. Геодинамічна інтерпретація результатів

Аналіз отриманих даних свідчить, що сучасні рухи земної кори України тісно пов'язані з будовою основних тектонічних структур.

Найбільш активними зонами є:

- Карпатський регіон;
- Закарпатський прогин;
- Переддобруджинський прогин;
- зони глибинних розломів Українського щита.

Встановлено, що межі найбільших градієнтів швидкостей збігаються з регіональними тектонічними розломами, що підтверджує їх сучасну геодинамічну активність.

ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ

1. На основі даних мереж GeoTerrace та System.NET визначено сучасні горизонтальні та вертикальні рухи земної кори України.
2. Середня швидкість вертикальних зміщень становить близько 0,7 мм/рік, причому переважають процеси опускання території.
3. Горизонтальні переміщення мають переважно південно-західний напрямок зі швидкостями 1–2 мм/рік.
4. Найбільш геодинамічно активними є Карпатський регіон, Закарпатський прогин та зони тектонічних розломів Українського щита.
5. Порівняння з моделлю ITRF2020 підтвердило достовірність отриманих результатів та можливість використання мереж GeoTerrace і System.NET для моніторингу сучасних рухів земної кори України.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі на тему **«Обробка даних постійних GNSS-спостережень мереж GeoTerrace та System.NET для визначення сучасних горизонтальних та вертикальних рухів земної кори України»** виконано комплексне дослідження сучасних геодинамічних процесів на території України на основі багаторічних супутникових спостережень.

У першому розділі проведено аналіз наукових джерел та сучасного стану досліджень рухів земної кори. Розглянуто природу та механізми виникнення горизонтальних і вертикальних переміщень земної поверхні, проаналізовано традиційні геодезичні методи дослідження деформацій земної кори, зокрема тріангуляцію, полігонометрію та високоточне нівелювання. Встановлено, що традиційні методи характеризуються високою точністю, проте потребують значних часових та матеріальних витрат і не забезпечують безперервного моніторингу геодинамічних процесів. Показано переваги використання глобальних навігаційних супутникових систем для визначення сучасних рухів земної кори, що забезпечують високу точність координатних визначень, оперативність отримання результатів та можливість дослідження процесів у глобальному масштабі.

У другому розділі наведено характеристику мереж постійно діючих GNSS-станцій GeoTerrace та System.NET, які сьогодні є одними з найбільших мереж супутникових спостережень на території України. Розглянуто структуру мереж, технічне оснащення станцій, особливості збору та архівування даних спостережень. Визначено критерії відбору станцій для проведення досліджень, серед яких тривалість часових рядів спостережень, стабільність обладнання, відсутність значних апаратних змін та локальних деформацій. Описано методика формування просторово-часових рядів координат та порядок обробки добових файлів спостережень у форматі RINEX. Розглянуто особливості визначення горизонтальних і вертикальних швидкостей зміщень станцій, а також процедуру порівняння отриманих

результатів із сучасними міжнародними референцними системами координат ITRF2020 та ETRF2020.

У третьому розділі виконано безпосередню обробку та аналіз результатів GNSS-спостережень. На основі сформованих часових рядів координат визначено сучасні швидкості горизонтальних та вертикальних рухів земної кори на території України. Встановлено, що горизонтальні переміщення мають переважно південно-західний напрямок та узгоджуються з загальними рухами Євразійської літосферної плити. Середні швидкості горизонтальних зміщень для більшості досліджуваних станцій становлять від 1 до 2 мм/рік.

Аналіз вертикальної складової рухів показав наявність як зон підняття, так і зон опускання земної поверхні. Найбільш виражені процеси підняття спостерігаються у Карпатському регіоні, Закарпатті та окремих районах Українського щита. Водночас для Переддобруджинського прогину, Причорноморської западини та окремих ділянок Дніпровсько-Донецької западини характерні процеси сучасного опускання. Отримані результати добре узгоджуються з геологічною будовою території України та сучасними уявленнями про її геодинамічний розвиток.

Важливим результатом дослідження стало підтвердження високої ефективності використання постійно діючих GNSS-мереж для моніторингу сучасних рухів земної кори. На відміну від традиційних методів геодезичних вимірювань, супутникові технології забезпечують можливість безперервного спостереження за деформаційними процесами, дозволяють оперативно виявляти зміни координат пунктів та формувати довгострокові часові ряди для геодинамічних досліджень.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання визначених швидкостей сучасних рухів земної кори для:

- удосконалення державної геодезичної мережі України;
- підтримання актуальності референцних систем координат;
- моніторингу тектонічно активних зон;

- прогнозування деформацій земної поверхні;
- забезпечення високоточного геодезичного та кадастрового виробництва;
- виконання інженерно-геодезичних робіт під час будівництва та експлуатації інфраструктурних об'єктів;
- проведення наукових геодинамічних досліджень.

Таким чином, поставлена мета дипломної роботи досягнута, а всі визначені завдання виконані. Отримані результати підтверджують доцільність використання даних постійно діючих GNSS-мереж GeoTerrace та System.NET для дослідження сучасних горизонтальних і вертикальних рухів земної кори України та створюють основу для подальшого розвитку національної системи геодинамічного моніторингу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анисенко О.В., Рощенко В.А. Сучасний стан розвитку Державної топографо-геодезичної мережі України // Агросвіт. – 2018. – №21. – С. 22–27.
2. Барановський В.Д., Карпінський Ю.О., Кучер О.В. Топографо-геодезичне та картографічне забезпечення ведення державного земельного кадастру. – Київ: НДІГК, 2009. – 96 с.
3. Бондар А.Л., Заєць І.М., Кучер О.В. Стан та основні напрямки розвитку Державної геодезичної мережі України // Вісник геодезії та картографії. – 2001. – №3. – С. 17–23.
4. Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Коллінз Д. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): теорія і практика. – Київ: Наукова думка, 1995. – 380 с.
5. Заєць І.М. Особливості загального вирівнювання Державної геодезичної мережі України // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2013. – Вип. 25. – С. 43–50.
6. Іщенко М.В. Зведена обробка спостережень регіональної GPS-мережі та її результати: дис. ... канд. фіз.-мат. наук. – 2012. – 146 с.
7. Карпінський Ю.О., Стопхай Ю.А. Державна геодезична мережа України І класу // Вісник геодезії та картографії. – 2010. – №1. – С. 24–29.
8. Кучер О.В., Лепетюк Б.Д., Стопхай Ю.А. Супутникові радіонавігаційні спостереження при реалізації УСК-2000 // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2005. – С. 26–32.
9. Кучер О.В., Ренкевич О.М., Лепетюк Б.Д. Дослідження референцних систем координат для території України. – Львів, 2002.
10. Кучер О.В., Ренкевич О.М., Заєць І.М. Науково-технічне забезпечення впровадження референцної системи координат України. – Львів, 2003.
11. Марченко О.М., Третьак К.Р., Ярема Н.П. Референцні системи в геодезії. – Львів: Львівська політехніка, 2013. – 216 с.

- 12.Савчук С.Г. Практичні аспекти застосування нової референцної системи УСК-2000 // Геофорум. – 2012.
- 13.Савчук С.Г. Побудова геодезичної референцної системи координат // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2002.
- 14.Черін А.Г., Горковчук М.В. Структура та функції геоportалу Державної геодезичної мережі України // Вісник геодезії та картографії. – 2013.
- 15.Закон України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність».
- 16.Постанова Кабінету Міністрів України №844 «Основні положення створення Державної геодезичної мережі України».
- 17.Постанова Кабінету Міністрів України №15 «Про Державну службу України з питань геодезії, картографії та кадастру».
- 18.Інструкція з обстеження та оновлення пунктів Державної геодезичної мережі України.
- 19.Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000–1:500.
- 20.Світова геодезична система координат WGS-84. Основні положення.
- 21.IERS Conventions (2010). International Earth Rotation and Reference Systems Service.
- 22.Moritz H. Geodetic Reference System 1980 // Bulletin Géodésique. – 1980.
- 23.Mueller I. Reference Coordinate Systems and Frames: Concepts and Realizations // Bulletin Géodésique. – 1985.
- 24.NIMA Technical Report 8350.2. Department of Defense World Geodetic System 1984. – 2000.
- 25.EUREF Permanent GNSS Network Guidelines.
- 26.ETRS89 – European Terrestrial Reference System.
- 27.ITRF – International Terrestrial Reference Frame Documentation.
- 28.Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. – Springer, 2008.
- 29.Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. GPS Satellite Surveying. – Wiley, 2015.
- 30.Misra P., Enge P. Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance. – 2011.

31. Teunissen P., Montenbruck O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. – 2017.
32. Seeber G. Satellite Geodesy. – Berlin: Walter de Gruyter, 2003.
33. Kaplan E., Hegarty C. Understanding GPS/GNSS. – Artech House, 2017.
34. Xu G., Xu Y. GPS Theory, Algorithms and Applications. – Springer, 2016.
35. Rizos C. Principles and Practice of GPS Surveying.
36. Blewitt G. Basics of the GPS Technique: Observation Equations.
37. Altamimi Z., Rebischung P. International Terrestrial Reference Frame.
38. GeoTerrace. Мережа референційних GNSS-станцій України.
39. System.NET. Геодезична RTN/RTK мережа України.
40. EPN Central Bureau. European Permanent GNSS Network.

ДОДАТОК А

Карта розташування ГНСС-станцій мереж GeoTerrace та System.NET на території України



Схема розташування постійно діючих ГНСС-станцій

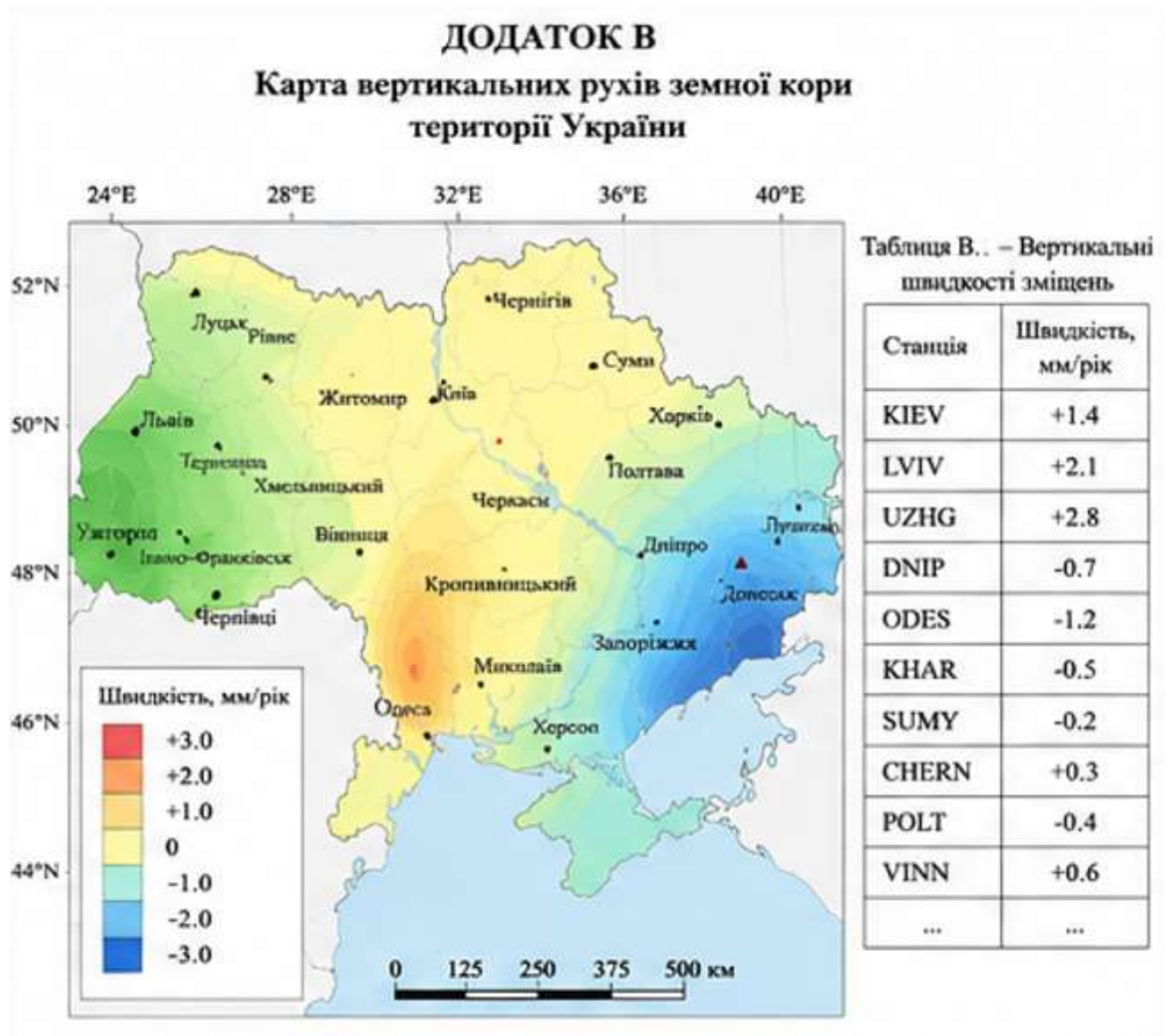


Вектори горизонтальних швидкостей сучасних рухів земної кори

Таблиця Б.1

Горизонтальні швидкості зміщень ГНСС-станцій

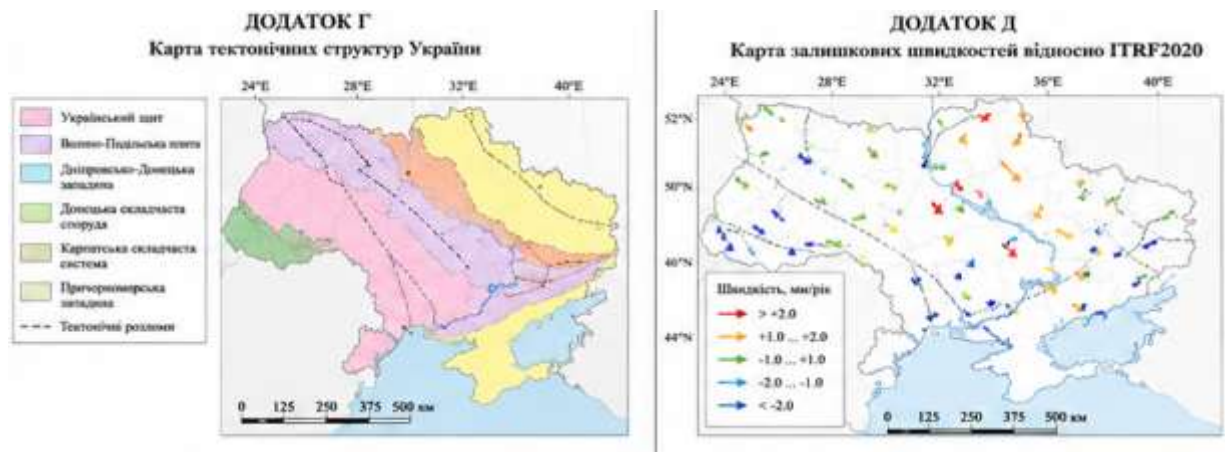
Станція	V_x , мм/рік	V_y , мм/рік	Загальна швидкість, мм/рік
KIEV	21.4	16.2	26.8
KHAR	22.1	15.9	27.2
ODES	20.7	17.1	26.9
LVIV	19.8	16.4	25.7
DNIP	21.6	15.7	26.7



Вертикальні швидкості зміщень території України

Таблиця В.1- Вертикальні швидкості зміщень

Станція	Швидкість, мм/рік
KIEV	+1.4
LVIV	+2.1
UZHG	+2.8
DNIP	-0.7
ODES	-1.2
KHAR	-0.5



Основні тектонічні елементи території України

Залишкові швидкості сучасних рухів земної кори

Таблиця Е.1

Тензор деформацій для окремих регіонів України

Регіон	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	ϵ_{xy}
Карпати	0.52	0.41	0.12
Поділля	0.18	0.15	0.05
Донбас	-0.24	-0.31	-0.09
Причорномор'я	0.13	0.07	0.04



Районування території України за інтенсивністю сучасних рухів

Категорії:

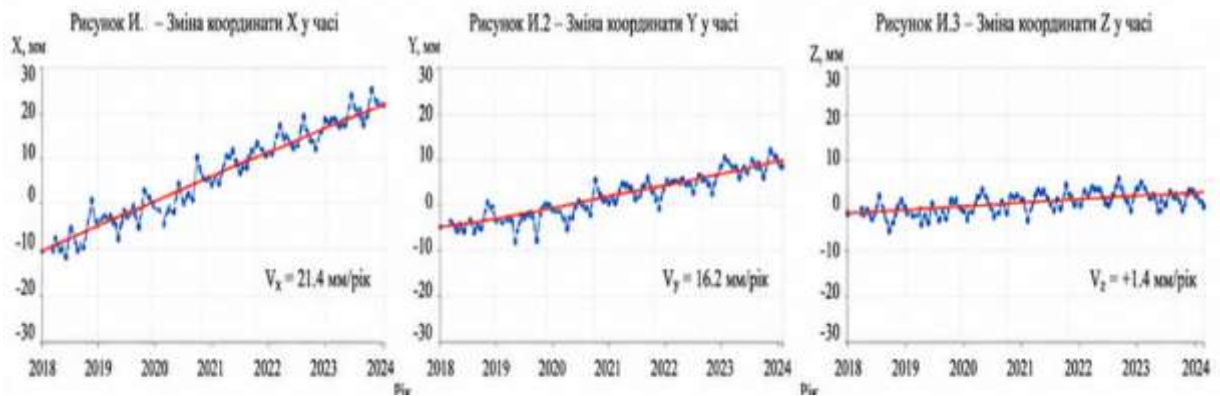
1. Високоактивні зони (>3 мм/рік).
2. Активні зони (1–3 мм/рік).
3. Помірно активні зони (0,5–1 мм/рік).
4. Стабільні території (<0,5 мм/рік).

Характеристика станцій спостережень

Станція	Широта	Довгота	Період спостережень	Мережа
KIEV	50.45	30.52	2018–2024	GeoTerrace
LVIV	49.84	24.03	2018–2024	GeoTerrace
DNIP	48.45	35.04	2018–2024	System.NET
ODES	46.48	30.73	2018–2024	System.NET
KHAR	49.99	36.23	2018–2024	System.NET

ДОДАТОК И

Графіки часових рядів координат (приклад для станції KIEV)



Графіки часових рядів координат

Зміна координати X у часі

Зміна координати Y у часі

Зміна координати Z у часі

Для кожної ГНСС-станції будуються часові ряди за період спостережень з трендовими лініями та визначенням швидкостей зміщення.