

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПЕТРОВ СЕРГІЙ ЛЕОНІДОВИЧ

УДК 528.48

ДИСЕРТАЦІЯ

МОНІТОРИНГ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ ТЕХНОГЕННО-
НАВАНТАЖЕНИХ ТЕРИТОРІЙ ГЕОДЕЗИЧНИМИ МЕТОДАМИ

05.24.01 - Геодезія, фотограмметрія та картографія

05 «Технічні науки»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник
Третяк Корнелій Романович
доктор технічних наук, професор

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради /Б. Паляниця/*

Львів – 2018

АНОТАЦІЯ

Петров С. Л. Моніторинг вертикальних зміщень техногенно-навантажених територій геодезичними методами.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 «Геодезія, фотограмметрія та картографія». – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерства освіти і науки України. Львів, 2018.

Дисертація присвячена дослідженням вертикальних зміщень техногенно-навантажених територій геодезичними методами, з врахуванням геодинамічних процесів різного характеру впливу. В залежності від місця розташування техногенно-навантаженої території на Землі, вплив геодинамічних процесів може проявлятися як на глобальному, так і на регіональному чи локальному рівнях. Правильне встановлення факторів впливу, при вирішенні тієї чи іншої поставленої задачі, підвищить надійність одержаних результатів при умові зменшення економічних витрат. Вивчення геодинамічних процесів різного характеру впливу переважно здійснюється геодезичними методами. Проведена класифікація геодезичних методів визначення вертикальних зміщень. Встановлено, що основним недоліком цих методів є дискретність та точковість одержуваної інформації. Існуючі методи опрацювання кінематичних мереж мають цілий ряд недоліків, серед яких: застосування методик опрацювання мереж, які знаходять реалізацію для якоїсь конкретної мережі; використання математичного апарату, який опрацьовує геодезичні виміри у вільній, а не кінематичній мережі; за результатами спостережень відсутня достовірна інформація про стан мережі між циклами спостережень. Проведено класифікацію цифрових інклінометрів за діапазоном роботи та точністю визначення кутів нахилу. На основі проведеної класифікації цифрових інклінометрів зроблені висновки про подальші напрямки використання в автоматизованих системах моніторингу техногенно-навантажених територій.

З метою врахуванням геодинамічних процесів різного характеру впливу розроблено методику опрацювання ГНСС – вимірів на кінематичних геодезичних мережах з врахуванням коефіцієнтів кінематики геодезичних пунктів. Коефіцієнт кінематики характеризує інтенсивність зміни відповідної проекції вектора протягом певної кількості циклів спостережень. Запропонована методика апробована на опорній мережі системи автоматизованого геодезичного моніторингу інженерних споруд Канівської ГЕС. Використання цієї методики, без прив'язки до перманентних станцій мережі ITRF, дозволяє ефективно вирішувати задачі з врахування впливу геодинамічних явищ локального характеру на досліджувану територію.

На прикладі опорної висотної мережі Рівненської АЕС реалізована методика математичного районування території техногенних геодинамічних полігонів за даними повторних висотних вимірів, та на основі цього проведено групування реперів за кінематичними характеристиками а також районування території об'єкту. В результаті проведених досліджень здійснено поділ території на три блоки, які характеризуються однаковою швидкістю нахилу території та періодом коливань.

Для підтвердження можливості використання геотехнічних методів в поєднанні з геодезичними методами в автоматизованих системах моніторингу розроблено методику сумісного опрацювання результатів геометричного нівелювання та вимірів інклінометрами. Ця методика експериментально перевірена. Результати експерименту доводять, що нахиломірні виміри можуть бути використані в комплексних автоматизованих системах моніторингу техногенно-навантажених територій, для визначення фонових (в межах жорсткої моделі) нахилів земної поверхні поряд з високоточним геометричним, гідростатичним чи гідродинамічним нівелюванням, які визначають аномальні (деформаційні) зміни земної поверхні.

Для вивчення та прогнозування руйнівних процесів в межах гірничого відводу шахтних полів рудника №2 Стебницького калійного родовища створена система автоматизованого моніторингу, яка складається з двох нахиломірних станцій. Вона дозволяє в режимі реального часу одержувати інформацію про величину та швидкість зміни максимального кута нахилу території та його азимут. За одержаними даними часових серій зміни максимального кута нахилу проведено умовне районування території шахтного поля на два блоки з різним напрямком та величиною нахилу, які утворюють прогин території західного флангу шахтного поля рудника №2, а також обчислені величини осідань досліджуваної поверхні. Одержані результати збігаються з даними опрацювання супутникових радарних вимірювань.

Ці результати дозволили розробити методику визначення місць ймовірних підземних обвалів. Дана методика апробована під час моніторингу території шахтних полів рудника №2. За час проведення досліджень зафіксовано цілий ряд підземних обвалів, 75% з яких розташовані у зонах деформацій земної поверхні, що визначені за даними опрацювання супутникових радарних вимірювань.

Ключові слова: техногенно-навантажені території, коефіцієнт кінематики геодезичних пунктів, кінематичні характеристики, районування території, цифрові інклінометри, нахиломірні виміри, кут нахилу території, імовірні підземні обвали.

Список публікацій здобувача

1. Петров С. Л. Аналіз стійкості пунктів системи автоматизованого геодезичного моніторингу інженерних споруд Канівської ГЕС / К. Р. Третяк, С. Л. Петров, Ю. І. Голубінка, Ф.К.Ф. Аль-Алусі //Геодезія, картографія та аерофотознімання, Л.: вид-во Львівської політехніки. – 2015.– вип.80. –С. 5 – 19.
2. Петров С. Л. Високоточні нахиломірні вимірювання для моніторингу території шахтних полів рудника №2 Стебницького

- калійного родовища / Заяць О. С., Наводич М. Б., Петров С. Л., Третяк К. Р. // Науковий журнал “Геодинаміка” – Л. –2017.–№2 (23) – С.25–33.
3. Петров С.Л. Моніторинг вертикальних зміщень території ГХП «Полімінерал» з використанням інтерферометричних методів обробки супутникових радарних вимірювань та нахиломірних спостережень / Мордвінов І.С., Пакшин М.Ю., Ляска І.І., Заяць О.С., Петров С.Л., Третяк К.Р.// Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – випуск I (35) . – Л. – 2018. – С.70–75
 4. S. Petrov Kinematics of Reference Height Network on The Territory of Rivne NPP / K. Tretyak, S. Petrov, S. Bokhonko, L. Babiyy, O. Shpakivskyuy // Reports on Geodesy and Geoinformatics. – 2014. – vol. 96. –pp. 55-66 : DOI: 10.2478/rgg-2014-0006.
 5. Петров С. Л. Сумісне опрацювання результатів високоточного геометричного нівелювання та нахиломірних вимірів / С. Л. Петров // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – випуск I (29) . – Л. – 2015. – С.70–75
 6. Петров С. Геодезичний моніторинг горизонтальних зміщень перекриття водозливної греблі Добротвірської ТЕС /Дейнека Ю., Петров С.// Геодезія, картографія та аерофотознімання, Л.: вид-во Львівської політехніки. – 2015.– вип. 69. С. 105–109.
 7. Петров С. Досвід виконання геодезичного контролю за технічним станом об’єктів паливно-енергетичного комплексу / Ю. Дейнека, Р. Озімбловський, С. Петров //Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва – № I (27). – Л.–2014. – С. 59–61

ANNOTATION

Petrov S. L. Monitoring of vertical displacement of technogenic-loaded territories by geodetic methods

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.24.01 "Geodesy, photogrammetry and cartography". – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine. Lviv, 2018.

The dissertation is devoted to research of vertical displacements of technogenic-loaded territories by geodetic methods taking into account geodynamic processes with different character of the influence. Depending on the location of the technogenic-loaded territory on the Earth, the influence of geodynamic processes can manifest itself on both the global and the regional or local levels. Proper determination of the factors of influence when solving a given task will increase the reliability of the results obtained on condition of reduction of economic costs. The study of geodynamic processes of various types of influence is mainly carried out by geodetic methods. The classification of geodetic methods for determining vertical displacements is carried out. It is established that the main disadvantage of these methods is the discreteness and stippling of the received information. Existing methods for processing of kinematic networks have a number of disadvantages, including: the application of network processing techniques that are realized for a particular network; use of mathematical tools, which works out geodetic measurements in a free, rather than a kinematic network; there is no reliable information about the state of the network between the observation cycles according to the results of observations. The classification of digital inclinometers for the range of work and accuracy of determination of angles of inclination are carried out. On the basis of implemented classification of digital inclinometers, conclusions about the further directions of use in automated monitoring systems of technogenic-loaded territories were made.

In order to consider geodynamic processes with different nature of influence, there was developed the method of processing of GNSS measurements on kinematic geodetic networks with the consideration of kinematics coefficients of geodetic points. The coefficient of kinematics characterizes the intensity of the change in the corresponding projection of the vector over a certain number of observation cycles. The proposed method was tested on the reference network of the system of automated geodetic monitoring of engineering structures of Kaniv HPP. The application of the methodology of processing of GNSS measurement without reference to the permanent stations of the ITRF network allows us to effectively solve problems with considering the influence of geodynamic phenomena of local character on the investigated territory.

On the example of the reference high-altitude network of Rivne NPP, the method of mathematical zoning of the territory of technogenic geodynamic landfills according to the data of repeated altitudinal measurements was implemented. On this base the bench mark grouping was performed according to the kinematic characteristics and zoning of the object's territory. As a result of the implemented research, the territory was divided into three blocks, which are characterized by the same velocity of the slope of the territory and the period of fluctuations.

The method for joint processing of results of geometric leveling and measurements by inclinometers was developed for confirmation of the possibility of using geotechnical methods in conjunction with geodetic methods in automated monitoring systems. This technique was experimentally tested, the results of the experiment proved that the tilt measurements can be used in complex automated monitoring systems of technogenic-loaded territories, for determination of the background (within the rigid model) tilts of the earth's surface, along with high-precision geometric, hydrostatic or hydrodynamic leveling, which determine abnormal (deformational) changes of the earth's surface.

For the study and forecasting of destructive processes on the territory within the mining fields of the mine №2 of Stebnyk potassium deposit, the system of automated monitoring has been created. It consists of two tilt-shaped stations and allows to receive real-time information about the magnitude and rate of change in the maximum angle of the terrain and its azimuth.

According to the data obtained from the time series of the change in the maximum angle of inclination, the conditional zoning of the mine field area into two blocks was implemented. These blocks have different direction and magnitude of the slope and form the deflection of the territory of the western flank of the mine №2. Additionally the values of sediments of the investigated surface were calculated. The obtained results coincide with the data processing of satellite radar measurements.

These results allowed to develop a methodology for determining the locations of probable underground cave-in. This technique has been tested during monitoring of the territory of mine fields of the mine №2. During the research period, a number of underground crashes were recorded, 75% of which are located in areas of deformation of the earth's surface, as determined by the data processing of satellite radar measurements.

Keywords: technogenic-loaded territories, coefficient of kinematics of geodetic points, kinematic characteristics, zoning of territory, digital inclinometers, tilting measures, tilt angle of the territory, probable underground cave-in.

List of publisher publications

1. S. Petrov. Analysis of stability of points of automated geodetic monitoring of engineering structures Kanev HPP/ K. R. Tretyak, S. L. Petrov, Yu.I. Holubinka, F.K.F. Al-Alusi// *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. – Lviv. – 2015. Vol. 80. P. 5-19.
2. S. Petrov. Precise tilt measurements for monitoring of mine fields at Stebnyk potassium deposit area. /O. Zayatsy, M. Navodych, S. Petrov, K. Tretyak// *Geodynamics*. – Lviv. – 2017. Issue 2 (23). – P. 25–33.

3. S. Petrov Monitoring of vertical movements on mining and chemical plant “Polimineral” area based on processing results of interferometric satellite radar images and tilt measurements./ I. Mordvinov, M. Pakshyn, I. Lyaska, O. Zayats, S. Petrov K. Tretyak // Modern achievements of geodesic science and industry. – Lviv. – 2018. Issue 1 (35). – P. 70–75.
4. S. Petrov Kinematics of Reference Height Network on The Territory of Rivne NPP / K. Tretyak, S. Petrov, S. Bokhonko, L. Babiy, O. Shpakivskyy // Reports on Geodesy and Geoinformatics. – 2014. – vol. 96. – pp. 55-66 : DOI: 10.2478/rgg-2014-0006.
5. S. Petrov. Compatible processing of results of high precision geometric levelling and inclination measurements /S. Petrov// Modern achievements of geodesic science and industry. – Lviv. – 2015. Issue 1 (29). – P. 70–75.
6. S. Petrov. Geodetic monitoring of horizontal displacements of overflow of drainage dam of Dobrotvir TPP /Yu. Dejneka, S. Petrov, // Geodesy, Cartography and Aerial Photography. – Lviv. – 2007. Vol. 69. P. 105-109.
7. S. Petrov. Experience of the geodetic control for the technical condition of the Fuel and Energy Complex objects /Yu. Dejneka, R. Ozimblivskyy, S. Petrov// Modern achievements of geodesic science and industry. – Lviv. – 2014. Issue 1 (27). – P. 59–61.

ЗМІСТ

ВСТУП	13
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ ТЕХНОГЕННО-НАВАНТАЖЕНИХ ТЕРИТОРІЙ	24
1.1 Необхідність проведення моніторингу вертикальних зміщень на геодинамічних полігонах.	25
1.2 Класифікація методів вимірювання вертикальних зміщень.	28
1.3 Методи опрацювання кінематичних мереж.	45
1.4 Види цифрових інклінометрів та їх застосування для моніторингу нахилів земної поверхні.	48
Висновки до розділу 1	52
РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ РАЙОНУВАННЯ ТЕРИТОРІЇ ПРОМИСЛОВИХ ОБ’ЄКТІВ	54
2.1 Модифікація методики опрацювання кінематичних мереж для ГНСС – вимірів.	55
2.2 Реалізація методики опрацювання кінематичних мереж для ГНСС – вимірів на прикладі опорної мережі системи автоматизованого геодезичного моніторингу інженерних споруд Канівської ГЕС.	60
2.3 Порівняння методики опрацювання кінематичних мереж для ГНСС – вимірів з класичною методикою.	71
2.4 Методика районування територій за результатами опрацювання кінематичних мереж.	74
2.5 Реалізація методики районування територій за результатами опрацювання кінематичних мереж на прикладі опорної висотної мережі на території Рівненської АЕС.	76
Висновки до розділу 2	84

	11
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ СУМІСНОГО ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ГЕОМЕТРИЧНОГО НІВЕЛЮВАННЯ ТА НАХИЛОМІРНИХ ВИМІРІВ	86
3.1 Теоретичне обґрунтування методики сумісного опрацювання.	87
3.2 Перевірка методики сумісного опрацювання.	91
3.3 Опрацювання результатів експериментальних досліджень.	97
Висновки до розділу 3	106
РОЗДІЛ 4. ЗАСТОСУВАННЯ НАХИЛОМІРНИХ ВИМІРІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТЕХНОГЕННО-НАВАНТАЖЕНИХ ТЕРИТОРІЙ	107
4.1 Причини виникнення техногенної небезпеки на території Стебницького калійного родовища.	108
4.2 Моніторинг території шахтних полів рудника №2 Стебницького калійного родовища шляхом проведення високоточних нахиломірних вимірювань.	112
4.3 Визначення місця розташування підземних обвалів за результатами нахиломірних спостережень.	121
Висновки до розділу 4	126
ВИСНОВКИ	127
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	129
ДОДАТКИ	151

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЕС	Атомна електрична станція
ТЕС	Теплова електрична станція
ГЕС	Гідроелектрична станція
СППМ	Середнє просторове положення мережі
СВМ	Середня висота мережі
ГНСС	Глобальні навігаційні супутникові системи
ПЗЗ	Пристрій з зарядовим зв'язком
EPN	Європейська мережа перманентних станцій
ITRF	Міжнародна наземна опорна мережа
VLBI	Very long baseline interferometry – довго базисна інтерферометрія
SLR	Лазерна локація штучних супутників землі
DORIS	Доплерівська орбітографія
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar – супутникова синхронна радарна інтерферометрія
ЦМР	Цифрова модель рельєфу
ЕГП	Екзогенні геологічні процеси

ВСТУП

В кінці XX та на початку XXI століття відбулися значні техногенні катастрофи на об'єктах паливо – енергетичного комплексу, підприємствах з видобутку корисних копалин. До таких катастроф можна віднести аварії на Чорнобильській (Україна) та Фукусімській (Японія) АЕС, Саяно-Шушенській (Росія), Ванqiao (Китай), Таum Sik (США) ГЕС, руйнівні землетруси в районах видобутку корисних копалин Сургута, Нефтегорска, Охи (Росія), Газлі (Узбекистан) і ін. Це призвело до колосальних людських жертв та великих матеріальних і моральних втрат. Так в результаті руйнування греблі на гідроелектростанції Ванqiao від затоплення прилеглих територій загинуло 14 600 чоловік. Ще 145 000 померло від голоду та епідемій, близько 11 000 000 залишилося без житла. Уникнення або мінімізація таких втрат можлива лише за умови організації комплексного вивчення стану техногенно-навантажених територій. Для цього необхідно враховувати не тільки техногенні та екзогенні фактори впливу на досліджувану територію, але й вплив природних геодинамічних процесів, які відбуваються на цих територіях.

Геодинамічні явища прийнято розділяти на три основні складові частини: глобальні, регіональні і локальні [83, 135, 171]. При такій класифікації під глобальної геодинамікою розуміємо динамічні процеси, що охоплюють всю Землю, включно і з такими великомасштабними геодинамічними явищами, як рух літосферних плит, динамічні зміни поверхні морів і океанів, варіації геопотенціалу в часі та інші аналогічні за масштабами, зміни на земній кулі. Під регіональною геодинамікою слід розуміти зміни положень точок земної поверхні, а також варіації гравітаційного поля, що відносяться до територій в межах однієї тектонічної плити чи щита. Прикладами можуть служити такі ділянки земної поверхні України, як Східноєвропейська платформа, Скіфська плита. До сфери впливу локальної геодинаміки віднесені регіони

протяжністю до 100 км, на яких виявляються деформації земної поверхні, які обумовлені тектонічними, техногенними та іншими факторами, що активно впливають на приповерхневі геологічні структури. Підвищений інтерес до вивчення геодинамічних явищ на локальному рівні, як правило, проявляється в зонах будівництва та експлуатації великих інженерних споруд (АЕС, ГЕС, підприємства з видобутку корисних копалин, тощо).

В залежності від місця розташування техногенно-навантаженої території на Землі, вплив геодинамічних процесів може проявлятися як на глобальному, так і на регіональному чи локальному рівнях. Правильне встановлення факторів впливу при вирішенні тієї чи іншої поставленої задачі підвищить надійність одержаних результатів при умові зменшення економічних витрат. У зв'язку з цим, необхідно розділяти методикую проведення досліджень, здійснювати оптимальний вибір приладів для їх проведення. Це дозволить в повному обсязі враховувати вплив геодинамічних явищ на техногенно-навантаженою територію, в залежності від місця її розташування.

У вивченні геодинамічних процесів на глобальному рівні важливу роль відіграють методи супутникового позиціонування, які дозволяють визначити геометричні форми Землі, нерівномірність її обертання, рухи літосферних плит, деформації земної кори, припливові явища, параметри гравітаційного поля Землі, різні техногенні процеси, а також цілий ряд інших, пов'язаних з Землею наукових напрямків. В останні роки для вирішення геодинамічних задач пов'язаних з деформацією земної кори почали використовуватися методи супутникової радарної інтерферометрії In SAR, високоточні радіоінтерферометричні спостереження з наддовгою базою (VLBI) [37, 82, 23].

Для вивчення регіональних геодинамічних явищ, на практиці застосовується повторне високоточне геометричне нівелювання, яке в поєднанні з регулярними спостереженнями за рівнем моря, дозволяє визначати сучасні вертикальні рухи земної кори (СВРЗК) в межах великих

територій. Доповненням цього методу можуть бути геотехнічні методи, які дозволяють одержувати перманентні дані про нахили земної поверхні в межах жорстких плит, що повинно стати доповненням до «дискретних», тобто одержаних з певною періодичністю даних, за результатами високоточного геометричного нівелювання. Також для регіональних геодинамічних досліджень використовуються результати супутникових спостережень [124, 149, 151].

Локальні геодинамічні явища вивчаються переважно шляхом проведення традиційних геодезичних вимірів на техногенно-навантажених територіях. Це методи ГНСС – спостережень, геометричне, тригонометричне, гідронівелювання. Не можна забувати і геотехнічні методи, які базуються на використанні інклінометрів, акселерометрів тощо. Головна мета таких спостережень є вивчення геодинамічних явищ техногенного походження в зонах будівництва та експлуатації великих гідроелектростанцій та інших гідротехнічних споруд [104], видобутку корисних копалин [90], раціонального використання надр.

Необхідно відзначити, що до останнього часу, на техногенно-навантажених територіях враховувався вплив лише локальних та в деякій мірі регіональних геодинамічних явищ [20, 19, 1, 123]. На даний час проведено ряд досліджень, які доводять взаємозв'язок між локальними, регіональними та глобальними геодинамічними процесами [69, 53].

Важливе значення для здійснення досліджень за регіональними та глобальними геодинамічними процесами є встановлення системи відліку координат. Так для оцінки стійкості опорних пунктів систем моніторингу Дніпровського каскаду ГЕС координати контрольних точок та їх просторові зміщення визначаються в єдиній світовій системі координат ITRF з подальшим їх опрацюванням за допомогою програмного забезпечення Bernese, або подібних програмних пакетів GAMIT/GLOBK, GIPSY-ASIS, NAPEOS. Така методика вимагає значних фінансових витрат та потребує наявності висококваліфікованих кадрів, для опрацювання

результатів, що є неефективним при вирішенні поставлених завдань на локальному рівні. Крім того виникають проблеми у врівноваженні мережі, в якій довжини векторів змінюються від сотень метрів (пункти локальної мережі ГЕС), до сотень кілометрів (пункти світової системи ITRF). Вирішення проблеми правильного встановлення системи відліку в таких мережах дозволить ефективно вирішувати поставлені задачі з найвищою точністю.

Вихідною основою для моніторингу вертикальних зміщень на техногенно-навантажених територіях є мережі реперів, висоти яких визначені за даними повторного високоточного геометричного нівелювання. Такі дані є дискретними і містять інформацію про стан мережі лише на момент проведення вимірювань. Тому, при здійсненні моніторингу вертикальних зміщень на локальному та регіональному рівнях, велика увага повинна приділятися стійкості пунктів мережі, на основі якої можливе прогнозування геодинамічних процесів між циклами спостережень. Це, в свою чергу, дозволить проведення районування досліджуваних територій за спільними кінематичними характеристиками. Така інформація буде корисною при подальшій експлуатації ГЕС, АЕС, підприємств з видобутку корисних копалин.

Використання різноманітних геодезичних (ГНСС – спостереження, геометричне, тригонометричне, гідронівелювання) та геотехнічних спостережень, для здійснення моніторингу техногенно-навантажених територій, потребує розробку нових нормативно – правових документів (методик, інструкцій). Такі документи повинні регламентувати проведення моніторингу на техногенно-навантажених територіях за даними геодезичних, геотехнічних спостережень, результатів дистанційного зондування земної поверхні, що в свою чергу, дозволить врахувати вплив усіх геодинамічних процесів на цих територіях.

Використання геотехнічних приладів в комплексних автоматизованих системах деформаційного моніторингу техногенно-навантажених

територій, для визначення фонових (в межах жорсткої моделі) нахилів земної поверхні, поряд з високоточним геометричним, гідростатичним чи гідродинамічним нівелюванням, які визначають аномальні (деформаційні) рухи земної поверхні можливе лише при застосуванні методики сумісного опрацювання цих результатів. Це вимагає проведення практичної перевірки такої методики, як на моделях, так і на реальних об'єктах моніторингу.

У розвиток теоретичних і практичних питань моніторингу вертикальних зміщень на геодинамічних полігонах значний внесок зробили такі вчені, як: П. І. Баран, К. О. Бурак, С. П. Войтенко, А. С. Мазницький, А. Л. Островський, К. Р. Третяк, П. Г. Черняга, В. Я. Чорнокінь, В. Н. Ганьшин, Ю. П. Гуляев, А. К. Зайцев, В. Е. Новак, М. Е. Пискунов, Г. П. Левчук, Г. А. Шеховцов, J. M. Acton, Bihter Erol, Ingo Neumann та інші.

Актуальність теми. На території України розташована велика кількість потенційно небезпечних об'єктів паливо-енергетичного комплексу, гідротехнічних споруд, підприємств з видобутку корисних копалин тощо. Експлуатаційний ресурс цих об'єктів здебільшого є практично вичерпаний. Тому, будь-які небезпечні явища ендегенного та екзогенного характеру (землетруси, зсуви земної поверхні, повені), техногенні фактори, викликані діяльністю людини, можуть призвести до масштабних катастроф. Неможна забувати про питання енергетичної безпеки держави, які в даний час набувають великого значення. Тому, геодезичний моніторинг техногенно-навантажених територій є важливим та необхідним фактором по запобіганню руйнування об'єктів, та при прогнозуванні деформацій інженерних споруд.

Техногенно-навантажені території та об'єкти, які на них розташовані, переважно знаходяться в сейсмоактивних зонах (ГЕС Дністровського каскаду, Стебницьке родовище калійних солей), на територіях з коливальними рухами земної кори (ГЕС Дніпровського каскаду,

Шебелинське газове родовище), в карстових районах (Рівненська та Хмельницька АЕС). У зв'язку з цим, вплив геодинамічних процесів на досліджуваній території може проявлятися як на глобальному, так і на регіональному чи локальному рівнях. У вивченні геодинамічних процесів на глобальному рівні важливу роль відіграють методи супутникового позиціонування та дистанційного зондування земної поверхні. Найпоширенішим способом регіональних геодинамічних досліджень є повторне високоточне геометричне нівелювання та супутникові спостереження. Локальні геодинамічні явища переважно вивчаються шляхом проведення традиційних геодезичних наземних вимірів (ГНСС – спостереження, геометричне, тригонометричне, гідронівелювання). Для ефективного та достовірного моніторингу вертикальних зміщень необхідно розділяти методику проведення таких досліджень, правильно застосовувати приладову базу для досліджень, а також використовувати ефективні методи опрацювання одержаної інформації. Це дозволить врахувати усі фактори впливу геодинамічних явищ на техногенно-навантажених території, в залежності від місця її розташування.

Ефективність геодезичного моніторингу буде досягнута не лише тоді, коли результати вимірів у геодезичних мережах будуть забезпечувати достовірний контроль деформаційних процесів на земній поверхні, але й тоді, коли ці результати будуть використані для прогнозування та проведення районування досліджуваних територій за спільними кінематичними характеристиками. При цьому, важливим фактором у вирішенні цієї проблеми є інформація про стійкість пунктів вихідної основи.

Поява нових геодезичних та геотехнічних приладів дає можливість створення комплексних систем моніторингу вертикальних зміщень техногенно-навантажених територій. Використання результатів геотехнічних спостережень у поєднанні з результатами геодезичних

вимірів потребує розробки методики сумісного опрацювання таких результатів та перевірки її на реальних об'єктах.

Дана робота спрямована на дослідження вертикальних зміщень техногенно-навантажених територій геодезичними методами з врахуванням геодинамічних процесів різного характеру впливу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Науково-дослідна робота автора відповідає науковому напрямку кафедри вищої геодезії і астрономії «Моніторинг фізичної поверхні Землі та її атмосфери на основі аналізу результатів сучасних наземних і супутникових вимірювань» та науковій тематиці робіт галузевої науково-дослідної лабораторії «Геодезичного моніторингу та рефрактометрії» (ГНДЛ-18) і навчально-наукової лабораторії «Опрацювання супутникових вимірювань» Інституту геодезії, Національного університету «Львівська політехніка».

Результати досліджень автора пов'язані з госпдоговірною та науково-дослідною роботою:

- «Дослідження та розробки в галузі геодезії і розробки корисних копалин (спостереження за осіданнями будівель і споруд енергоблоків № 1,2 та контроль висотної мережі ВП «РАЕС»));
- «Надання науково-технічних послуг для встановлення перманентної системи деформаційного моніторингу ГЕС та сумісне опрацювання даних ГНСС та ПСДМ», контракт № УНЕ/Т-DAM2-20/09 додаткова угода №1437;
- «Виконання геологорозвідувальних та топографо-геодезичних робіт для здійснення моніторингових досліджень в межах гірничого відводу шахтних полів рудників №1 №2 Стебницького калійного родовища та території дамб хвостосховища» угода № 811/03-12/17 від 26.12.2017 р.

Мета і завдання досліджень. Основною метою в роботі є підвищення точності та достовірності результатів моніторингових досліджень вертикальних зміщень техногенно-навантажених територій геодезичними

та геотехнічними методами для врахування впливу геодинамічних процесів, які відбуваються на цих територіях. Для досягнення цієї мети в роботі необхідно розв'язати такі завдання:

1. На основі критичного аналізу методів визначення вертикальних зміщень техногенно-навантажених територій обґрунтувати можливість застосування для цього геотехнічних методів;
2. Розробити методику опрацювання ГНСС – вимірів на кінематичних геодезичних мережах з врахуванням коефіцієнтів кінематики геодезичних пунктів;
3. Розробити методику математичного районування території техногенних геодинамічних полігонів за даними повторних висотних вимірів;
4. Розробити методику дослідження просторової кінематики техногенно-навантажених територій та визначення імовірних місць підземних руйнівних явищ за результатами геотехнічних спостережень.

Об'єктом дослідження є моніторинг вертикальних зміщень на техногенно-навантажених територіях.

Предметом дослідження є опрацювання результатів геодезичних та геотехнічних спостережень на техногенно-навантажених територіях комплексними геодезичними та геотехнічними методами.

Методи досліджень. При виконанні даної роботи застосовували методи лінійної алгебри, математичного аналізу та статистичні методи математичного опрацювання геодезичних спостережень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що в роботі на основі результатів геодезичного та геотехнічного моніторингу техногенно-небезпечних територій уперше:

1. Розроблена методика опрацювання ГНСС – вимірів на кінематичних геодезичних мережах з врахуванням коефіцієнтів кінематики геодезичних пунктів опорної мережі геодезичного моніторингу інженерних споруд, на прикладі Канівської ГЕС.

2. Розроблена методика математичного районування території техногенних геодинамічних полігонів за даними повторних висотних вимірів, яка апробована на території Рівненської АЕС.
3. Розроблена та експериментально перевірена методика сумісного опрацювання результатів геометричного нівелювання та вимірів інклінометрами.
4. Розроблена та експериментально перевірена методика визначення нахилів земної поверхні за результатами інклінометричного моніторингу.
5. Розроблено метод визначення місць підземних обвалів за даними нахиломірних спостережень на території рудника №2 Стебницького родовища калійних солей. Показано, що одержані результати узгоджуються з результатами супутникової радарної інтерферометрії.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Методику застосовано для опрацювання ГНСС – вимірів на геодезичних мережах з врахуванням коефіцієнтів кінематики геодезичних пунктів у локальній мережі автоматизованого геодезичного моніторингу інженерних споруд Канівської ГЕС, що дозволяє опрацьовувати дані спостережень без використання дорогого та складного в реалізації програмного забезпечення Bernese та без прив'язки до перманентних базових станцій;
2. На прикладі опорної висотної мережі Рівненської АЕС реалізована методика математичного районування території техногенних геодинамічних полігонів за даними повторних висотних вимірів, та на основі цього проведено групування реперів за кінематичними характеристиками та районування території об'єкту;
3. За результатами експериментальних досліджень підтверджено методику сумісного опрацювання нахиломірних спостережень та даних геометричного нівелювання;
4. За результатами нахиломірних спостережень отримані результати просторової кінематики території рудника № 2 Стебницького родовища

калійних солей для її районування та визначення імовірних місць підземних руйнівних явищ.

5. Методи та результати досліджень можуть бути впроваджені в навчальний процес для студентів спеціальності – 193 Геодезія та землеустрій, в дисциплінах «Геодезичний моніторинг геодинамічних явищ та інженерних споруд» та «Моніторинг і прогнозування напружено-деформованого стану територій, будівель та споруд» та спеціальності – 103 Науки про Землю в дисциплінах «Основи геофізики».

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи, отримані автором, опубліковані в співавторстві у працях [26, 27, 36, 67, 98, 147] та одноосібно – [80]. В опублікованій праці [26] автору належать експериментальні дослідження для визначення зміщень перекриття водозливної греблі Добротвірської ТЕС; у праці [27] – підтвердження можливості застосування геодезичного моніторингу на техногенно-небезпечних територіях; у праці [36] – розробка методики районування техногенно-навантажених територій за даними високоточних нахиломірних спостережень. У роботі [67] – методика визначення місць підземних руйнівних явищ за результатами нахиломірних спостережень. У роботі [98] – апробація методики опрацювання ГНСС – вимірів на кінематичних геодезичних мережах з врахуванням коефіцієнтів кінематики геодезичних пунктів. У роботі [147] – розробка та апробація методики математичного районування території техногенних геодинамічних полігонів за даними повторних висотних вимірів.

Апробація результатів роботи. Основні теоретичні та експериментальні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях:

1. Міжнародна наукова-технічна конференція «Геофорум 2014» (Яворів, Львів) у 2014 р.
2. Міжнародна наукова-технічна конференція «Геофорум 2015» (Львів, Брюховичі) у 2015 р.

3. Міжнародна наукова-технічна конференція «Геофорум 2018» (Львів, Брюховичі) у 2018 р.

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 7 наукових праць. Чотири статті в наукових фахових виданнях з переліку МОН України, дві входять до наукометричної бази даних Index Copernicus та одна до наукометричної бази даних Web of Science.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (172 найменувань) та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 155 сторінки, ілюстрації складають: 55 рисунків, 19 таблиць, 1 додаток.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ ТЕХНОГЕННО-НАВАНТАЖЕНИХ ТЕРИТОРІЙ

При проектуванні та створенні геодинамічних полігонів на техногенно-навантажених територіях вирішуються завдання раціонального вибору району створення полігону, його розмірів і визначення частоти спостережень, таким чином, щоб геодезичні дані задовольняли цілям моніторингу. Ці питання, а також питання опрацювання та аналізу результатів спостережень детально розглянуті в роботах [161, 111, 72, 25]. Безпека експлуатації інженерних споруд та обладнання на техногенно-навантажених територіях, таких як об'єкти енергетичного комплексу, греблі, мости та тунелі, родовища корисних копалин, вимагає періодичного ведення їх моніторингу [27, 1]. Моніторинг деформацій споруд є однією з областей застосування високоточних геодезичних методів і засобів вимірювань. Тому відстеження структурних деформацій внаслідок впливів зовнішніх навантажень має велике значення для підтримки функціонування інженерних споруд на техногенно-навантажених територіях в належному стані.

Необхідно відзначити, що дані геодезичного моніторингу, істотно впливають на вирішення проблем техногенно-навантажених територій, але для комплексного вирішення одних геодезичних даних недостатньо. Поява цілого ряду електронних геодезичних та геотехнічних вимірювальних приладів (індикатори годинникового типу, рівнеміри, датчики рівня, тензometri, нахиломіри, акселерometri) дозволила автоматизувати процес вимірювань при вирішенні задач моніторингу територій [127]. Основними перевагами цифрової вимірювальної техніки перед аналоговою є: швидкість вимірювань, висока точність, зручність одержання первинних даних та їх автоматичне опрацювання, а також практично повне виключення «людського фактору», аж до досягнення кінцевого результату роботи. Для ефективного здійснення моніторингу вертикальних зміщень на

геодинамічних полігонах з використанням сучасних приладів необхідно впроваджувати нові та вдосконалювати існуючі методи проведення вимірювань, розробляти нові методики опрацювання результатів спостережень.

1.1 Необхідність проведення моніторингу вертикальних зміщень на геодинамічних полігонах

Під терміном «геодинамічний полігон» розуміють територію, в межах якої ведеться комплекс регулярних геодезичних і гравіметричних спостережень, для визначення деформацій земної поверхні і змін локального гравітаційного поля, а також вивчення розвитку цих явищ у часі. Геодезичні мережі на геодинамічних полігонах створюються відповідно до їх призначення. Геодинамічні полігони умовно поділяють на прогностичні і техногенні, залежно від того чим викликані деформації, які спостерігаються (природні або техногенні фактори). До прогностичних переважно відносять полігони, які створюються для вивчення деформацій, причини виникнення яких носять тектонічний характер. Основне завдання виконання вимірювань на таких полігонах – виявлення і спостереження за змінами аномальних деформацій, які можуть бути провісниками землетрусів чи вивержень вулканів. До прогностичних полігонів на території України можна віднести Карпатський та Кримський геодинамічні полігони.

Інша група геодинамічних полігонів створюється з метою контролю за рухами і деформаціями земної кори поблизу великих техногенно небезпечних об'єктів. До таких об'єктів відносяться території підприємств з видобутку корисних копалин (користування надрами), території АЕС і ГЕС, ключові транспортні елементи (тунелі, мости), екологічно небезпечні підприємства, деякі оборонні об'єкти та ін.

Вивчення сучасних геодинамічних рухів, поряд з великим значенням для фундаментальної галузі наук про Землю, відіграє важливу роль в

вирішенні найважливішої прикладної проблеми – запобігання природно-технічних катастроф на техногенно-навантажених територіях [17, 106, 14].

Користування надрами включає не тільки видобуток корисних копалин, але і всю сферу людської діяльності на цій території. Тобто, весь мінерально-сировинний комплекс з видобутку, переробки і транспортування корисних копалин. Це також весь будівельний комплекс, пов'язаний із зведенням споруд на земній поверхні і в підземних умовах.

За останні десятиліття на гірничих підприємствах з видобутку твердих корисних копалин в Україні відбулися значні техногенні катастрофи (Стебницьке родовище калійних солей, підприємство “Солотвинський солерудник”, ДГХП “Сірка” у м. Яворів). Відзначимо при цьому, що всі вони спостерігалися в районах, віднесених до відносно сейсмічно спокійних територій. На території цих підприємств періодично виникають руйнування промислових та житлових будівель, інженерних споруд, транспортних та підземних комунікацій.

Часті аварії відбуваються на магістральних нафтопроводах і газоппроводах. Наслідком їх є шкода навколишньому середовищу та навіть загибель людей [93].

Аварії і катастрофи відбуваються також і в районах, де не ведеться видобуток корисних копалин. Причиною їх розвитку і появи, в багатьох випадках, є сучасні геодинамічні явища техногенного походження в зонах будівництва та експлуатації АЕС і ГЕС, інших гідротехнічних споруд [5]. За минулі десятиліття на Україні та світі відбулися катастрофічні аварії на цих об'єктах. Вони спричинили загибель сотень тисяч людей та значні руйнування інфраструктури. До таких катастроф можна віднести аварії на Чорнобильській (Україна) та Фукусімській (Японія) АЕС, Саяно-Шушенській (Росія), Ванqiao (Китай), Taum Sik (США) гідроелектростанціях. Усе це підтверджує важливість і необхідність проведення моніторингу вертикальних деформацій земної поверхні на

техногенно-навантажених територіях геодезичними методами [47, 51, 40, 57, 26].

Для моніторингу вертикальних зміщень застосовуються повторні геодезичні вимірювання. Суть їх полягає в тому, що на геодезичних пунктах геодинамічного полігону проводяться багаторазові вимірювання через деякі проміжки часу (цикли). По завершенню чергового циклу спостережень, з'являється можливість визначення зміни взаємного положення центрів пунктів, а отже, дає можливість зафіксувати величину вертикального руху [34]. Для цього вимірювання необхідно проводити з найвищою можливою точністю, за певною методикою, та з певною періодичністю [32]. Крім того, при проведенні моніторингу на геодинамічних полігонах, велика увага повинна приділятися стану вихідної геодезичної основи, а саме: інформації про стійкість пунктів мережі, на основі якої можливе прогнозування деформаційних процесів.

Геодезичні вимірювання на геодинамічних полігонах до 1991 року проводилися згідно керівних технічних матеріалів та методичних вказівок [21, 86, 87, 110], які регламентували проведення геодезичних вимірів, опрацювання одержаних результатів та їх аналіз, для визначення деформацій на геодинамічних полігонах.

За часи незалежності України була розроблена настанова по проведенню моніторингу вертикальних зміщень будівель та споруд на території техногенних геодинамічних полігонів об'єктів АЕС та ТЕС [92]. Дана настанова входить до складу системи нормативних документів України, які вдосконалюють методику, регламентують діяльність з проектування та будівництва нових ядерних установок, теплових електростанцій, реконструкцію та розширення діючих, а також їх експлуатацію.

Необхідно відзначити, що існуючих нормативних документів є недостатньо для проведення геодезичного моніторингу техногенно-навантажених територій в сучасних умовах. Вони передбачають

проведення геодезичних вимірів на території геодинамічних полігонів традиційними методами (високоточне геометричне нівелювання, гідростатичним та гідродинамічним нівелюванням та інше). Дискретність та точковість (виміри відносяться до конкретної точки земної поверхні) одержуваної інформації такими методами знижує оперативність контролю за вертикальними рухами земної кори та обмежує можливості по прогнозуванню деформаційних процесів на техногенно-навантажених територіях. Використання сучасних електронних геодезичних та геотехнічних приладів дасть змогу вирішити цю проблему.

Застосування геодезичних та геотехнічних методів у поєднанні з методами супутникової радарної інтерферометрії In SAR дозволить здійснювати оперативний моніторинг вертикальних рухів земної кори та проводити районування техногенно-навантажених територій за спільними кінематичними характеристиками. Така інформація буде корисною не тільки при забезпеченні практичних результатів по проведенню моніторингу вертикальних рухів, але й у вирішенні цілого ряду наукових задач.

1.2. Класифікація методів вимірювання вертикальних зміщень

Для визначення вертикальних зміщень техногенно-навантажених територій застосовуються геодезичні, геотехнічні, геологічні, геофізичні методи [1, 45, 44, 20, 58].

Геологічні методи (морфометричні, геохімічні) (рис 1.1) полягають у вивченні коливних рухів за певний відрізок часу використовуючи склад та потужності гірських порід. Цей метод застосовується для довгоперіодичних вертикальних рухів тривалість яких сягає тисячі років і більше [121].



Рис. 1.1 Класифікація методів моніторингу вертикальних зміщень

До геофізичних методів вивчення вертикальних зміщень техногенно-навантажених територій відносяться сейсмічні, магнітні та гравітаційні методи. Сейсмічний метод базується на фіксації коливань, які виникли внаслідок різноманітних геологічних чи техногенних процесів. Магнітний метод полягає у вивченні часових змін локального магнітного поля за результатами геомагнітних спостережень на геомагнітних станціях чи обсерваторіях. Гравітаційний метод ґрунтується на визначенні зміни прискорення сили земної ваги за певний період часу [94].

Основною перевагою цих методів є те, що за допомогою них, можна встановити зміщення та деформації земної поверхні на техногенно-навантажених територіях за значні проміжки часу, а також робити реконструкції цих рухів на якийсь період минулого. Суттєвим недоліком геологічних та геофізичних методів є те, що вони дають головним чином якісну характеристику вертикальних зміщень і лише їх відносну кількісну оцінку.

До геотехнічних методів моніторингу вертикальних зміщень можна віднести нахиломірні спостереження, акселерометричні вимірювання, вимірювання з використанням різноманітних перетворювачів (щілиномірів, нутромірів, тензометрів тощо). Здійснення моніторингу з допомогою нахиломірних станцій переважно базується на принципі горизонтального маятника, підвішеного на двох нитках. Чутливість їх відносно висока і вони дозволяють реєструвати зміну нахилу території на регіональному рівні [30]. Необхідно відзначити, що геотехнічні методи дають ефективні результати моніторингу у поєднанні з геодезичними методами [133, 137].

Геодезичні методи моніторингу вертикальних зміщень можна розділити на наземні, наземно-дистанційні (ГНСС – метод, VLBI, SLR, DORIS, фотограмметричні методи) та дистанційні (In SAR, аерокосмічні методи) (рис. 1.2).

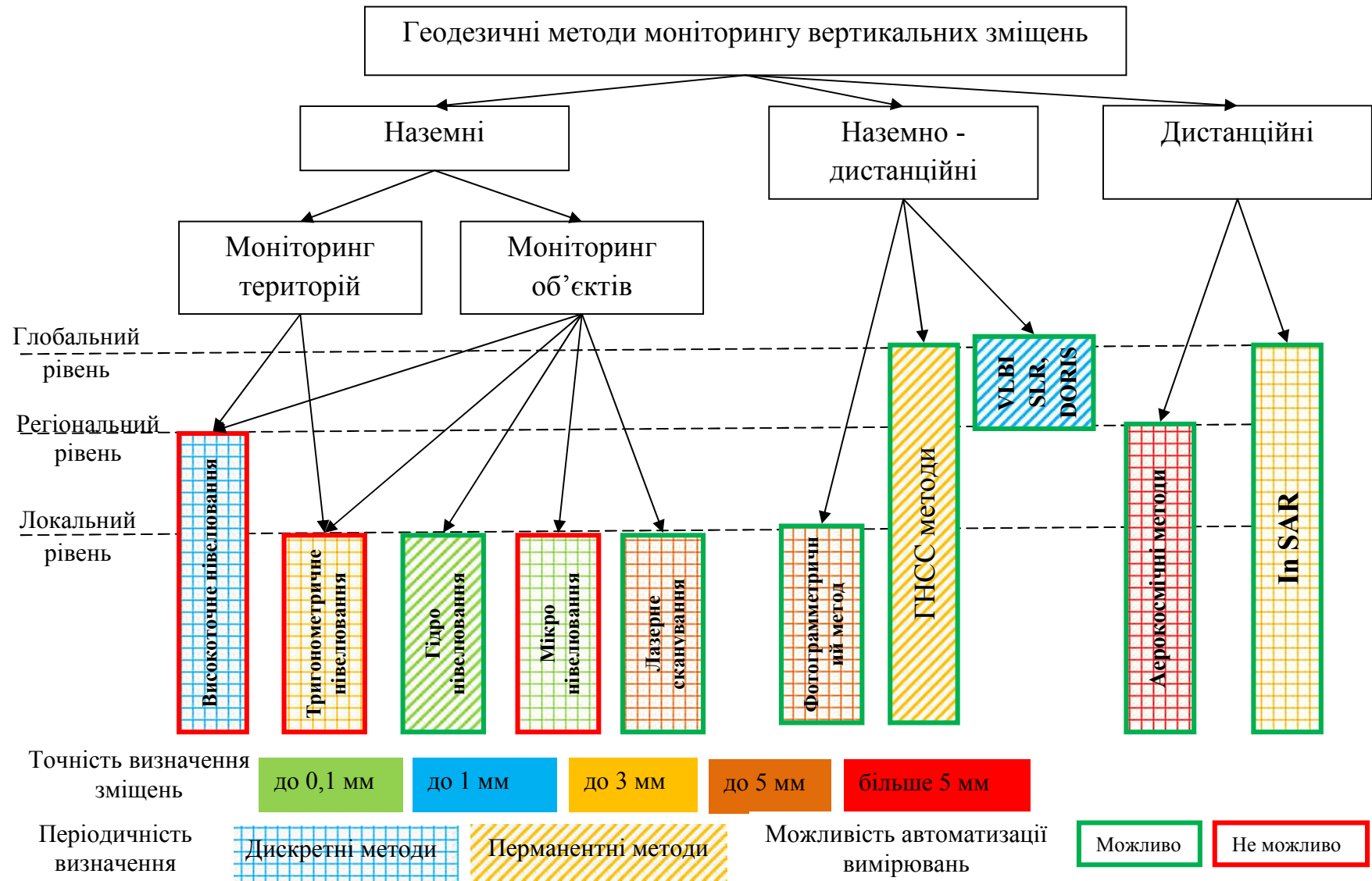


Рис. 1.2 Класифікація методів геодезичного моніторингу вертикальних зміщень

Наземні методи в свою чергу застосовуються для моніторингу територій (високоточне геометричне нівелювання, тригонометричне нівелювання) та об'єктів (високоточне геометричне нівелювання, тригонометричне нівелювання, гідро-, мікро- нівелювання, лазерне сканування). Різні методи геодезичного моніторингу застосовуються для врахування вертикальних зміщень викликаних впливом геодинамічних явищ різного характеру (локальні, регіональні, глобальні).

Крім того необхідно відзначити, що існує ряд вимог, які обумовлюють застосування тих, чи інших геодезичних методів при моніторингу вертикальних зміщень а саме:

- вимоги до точності вимірювань;
- необхідність безперервного отримання результатів;
- автоматизація процесу вимірювання;
- проведення вимірювань з мінімальними витратами;
- можливість застосування на різних рівнях моніторингу.

Проведемо аналіз існуючих геодезичних методів до відповідності цим вимогам.

Високоточне геометричне нівелювання вирішує питання моніторингу вертикальних зміщень на локальному та регіональному рівнях. Застосування високоточного геометричного нівелювання для ведення моніторингу вертикальних зміщень детально розглянуто в роботах [109, 76, 9, 162]. Геометричне нівелювання застосовується при спостереженні за деформаціями гідротехнічних споруд [46], при будівництві та експлуатації об'єктів паливо – енергетичного комплексу [103]. Для підвищення точності значну увагу приділено питанням розробки методик врахування вертикальної рефракції при проведенні високоточного нівелювання [73, 28 78].

Враховуючи те, що вертикальні рухи переважно знаходяться в межах 1–5 мм/рік, визначати їх на основі повторних вимірювань високоточним

геометричним нівелюванням за невеликий проміжок часу можливо лише за умови, що вимірювання будуть проводитися з найвищою точністю [90].

В роботі [74] розглядається проблема застосування високоточного геометричного нівелювання на геодинамічних техногенних територіях, та можливості проведення наукових досліджень на них. Питання розрахунку та підвищення точності високоточного геометричного нівелювання на геодинамічних полігонах розглянуто в статті [48]. Вибір оптимальної періодичності проведення спостережень для деформаційного моніторингу розглянуто в роботах [75, 108]. Розробка методики опрацювання висотних кінематичних мереж та врахування впливу похибок на їх точність розглянуто в роботах [78, 100]. Велика увага повинна приділятися стану вихідної нівелірної мережі, а саме інформації про стійкість пунктів, на основі якої можливе прогнозування геодинамічних процесів та проведення районування досліджуваних територій за спільними кінематичними характеристиками.

Аналізуючи використання методу геометричного нівелювання для геодезичного моніторингу можна зробити наступні висновки про переваги та недоліки (рис 1.2):

- на даний час високоточне нівелювання є одним з найточніших методів, який дозволяє здійснювати моніторинг вертикальних зміщень на локальному та регіональному рівнях;
- основним недоліком геометричного нівелювання є точковість одержуваної інформації та дискретність результатів спостереження (відсутність даних між циклами спостережень);
- недостатня ступінь автоматизації процесу вимірювання;
- вплив «людського фактору» під час вимірювання.

Спосіб тригонометричного нівелювання дозволяє визначати перевищення точок, що розміщені на суттєво різних висотах, у важко досяжних місцях, коли застосування геометричного нівелювання не забезпечує потрібної точності вимірів у зв'язку з необхідністю

прокладання ходів значної протяжності. Проте у звичайних умовах тригонометричне нівелювання суттєво поступається геометричному. Основними причинами цього є вплив на точність вимірювання зенітних кутів вертикальної рефракції і похибок за центрування та редукцію, а також приладових помилок [78]. Застосування тригонометричного нівелювання для моніторингу техногенно-навантажених територій розглянуто в роботах [61, 41]. Використання високоточних електронних тахеометрів, застосування двостороннього тригонометричного нівелювання, мінімізація похибок за центрування та редукцію та прецизійне визначення висот інструменту і візирної цілі дозволяє значно підвищити точність визначення перевищень точок цим методом [55, 59]. Аналізуючи використання методу тригонометричного нівелювання для геодезичного моніторингу можна зробити наступні висновки про переваги та недоліки (рис 1.2):

- застосування сучасних високоточних електронних тахеометрів дозволяє конкурувати цьому методу з геометричним нівелюванням у випадку великих перепадів висот між пунктами спостережень;
- зменшення витрат часу та матеріальних ресурсів у порівнянні з геометричним нівелюванням;
- метод тригонометричного нівелювання може бути використаний лише на локальному рівні моніторингу;
- основним недоліком тригонометричного нівелювання є значний вплив вертикальної рефракції на одержані результати, а також точковість та дискретність результатів спостереження.

При експлуатації об'єктів гідроенергетики, прискорювачів заряджених частинок, атомних і теплових електростанції та інших подібних об'єктів, необхідний безперервний геодезичний контроль за їх осіданнями та деформаціями. Для цих цілей розроблені різні стаціонарні гідростатичні і гідродинамічні системи з візуальним збором інформації [12,

6, 64]. А на спорудах, де перебування людини небажано або взагалі виключається, розроблені гідросистеми з дистанційним отриманням інформації про висотні переміщення осадкових марок. В статті [65] описані гідростатичні системи типу СГН-27Д і СГН-ВІ з діапазонами вимірювань 4 мм і до 10–12 мм і з похибками визначення перевищень 0,2 мм і гідродинамічні системи СГД, у яких використовується рухома рідина. В праці [167] викладається методика застосування розробленої автором прецизійної автоматичної системи ELWAAG/ELMETER гідростатичного нівелювання при спостереженнях за деформаціями фундаментів турбоагрегатів великої потужності. Описано конструкцію приладів, розміщення датчиків стаціонарної системи, способи опрацювання і представлення результатів спостережень. В роботі [134] наведено теоретичне обґрунтування подвійної гідродинамічної системи, яка дозволяє виконувати вимірювання перевищень на декількох горизонтах однієї вимірювальною голівкою.

Значних успіхів в впровадження систем гідростатичного нівелювання досягнуто в науково-дослідному інституті геодезії, топографії та картографії (Чеська республіка). Там розроблена система датчиків HUNI і INVA, яка характеризується похибками визначення перевищень 0,05 мм [54].

Аналізуючи використання методів гідростатичного та гідродинамічного нівелювання можна виділити основні переваги, а саме (рис 1.2):

- висока ступінь автоматизації процесу вимірювання;
- можливість використання даних систем на об'єктах, де перебування людини небажано або взагалі виключається;
- одержання інформації про стан об'єкту в реальному часі;

До недоліків цих методів слід віднести:

- методи гідро нівелювання може бути використаний лише на локальному рівні моніторингу технологічного обладнання;

- необхідність врахування певних інструментальних помилок та помилок зовнішнього середовища для одержання результатів високої точності;
- точковість результатів спостереження;
- застосування гідросистем пов'язано зі значними організаційними та технологічними труднощами.

Метод мікронівелювання застосовують при спостереженнях за взаємним висотним положенням близько розташованих точок на відстані 1–1,5 м. Він використовується при визначенні осідань і нахилів окремих конструкцій: фундаментів, балок, ферм, технологічного обладнання. Вимірювання виконують за допомогою мікронівеліра. Приладова точність мікронівеліра характеризується середньою квадратичною похибкою (СКП) визначення перевищення, яка рівна 0,01мм. В роботі [10] розглянуто використання електронного мікронівеліра для визначення геометричних параметрів технологічного обладнання АЕС (реакторної установки та центру обіжних насосів). Цей метод дозволяє здійснювати контроль основних параметрів з СКП 0,05мм. Аналізуючи використання методу мікронівелювання для геодезичного моніторингу можна зробити наступні висновки (рис 1.2):

- на даний час цей метод є найточнішим;
- використання даного методу для спостереження за взаємним висотним положенням лише близько розташованих точок (1 – 1,5 м) є його недоліком;
- метод мікронівелювання знайшов застосування лише при контролі параметрів окремих конструкцій споруд.

Фотограмметричний метод передбачає застосування фототеодоліта для фотознімання об'єкту геодезичного моніторингу. Визначення деформацій взагалі й зокрема осідань цим способом полягає у вимірюванні різниці координат точок споруди, що знайдені на фотознімках початкового (або попереднього) циклу та фотознімках деформаційного (або

наступного) циклу. Деформації визначаються в одній вертикальній площині, тобто, паралельній площині фотознімка. В якості прикладу застосування фотограмметрії для спостереження за деформаціями будівель та споруд можна привести описану в роботі [156] методику і техніку наземного стереознімання, що застосовується у Німеччині, для спостереження за деформаціями споруд під впливом гірничих розробок. Показано, що при звичайному методі знімання, СКП визначення координат точок становить 5 мм, а за рахунок застосування вирівнювання за зв'язками може бути доведена до 2 мм. Про приклади визначення розмірів різних інженерно - промислових споруд (радіотелевізійної щогли заввишки 240 м, градирні гіперболоїдної форми, підйомні крани, несучі стіни будівель) з СКП 1-15 мм фотограмметричним методом розглянуто в роботі [119]. Сучасні фотограмметричні вимірювальні системи, обладнані малоформатними цифровими фотокамерами і ПЗЗ - датчиками дозволяють визначати положення точок зображень об'єктів на невеликих відстанях з СКП 0,1 мм [164].

Аналізуючи використання фотограмметричних методів для геодезичного моніторингу можна зробити наступні висновки (рис 1.2):

- висока швидкість проведення вимірювань, та мінімальний час перебування у «польових умовах»;
- фотограмметричний метод може бути використаний лише на локальному рівні моніторингу території та технологічного обладнання;
- недоліком даних методів є відносно невисока точність одержаних результатів, дискретність одержуваної інформації.

В даний час при проведенні геодезичного моніторингу все частіше застосовуються сучасні технології лазерного сканування. В їх основі лежить здатність променя лазера відбиватися від наземних об'єктів або поверхні Землі [84]. Основна відмінність процесу лазерного сканування від вимірювань електронним тахеометром – набагато більша швидкість

вимірювань, наявність сервоприводу, який автоматично повертає вимірювальну частину приладу як в горизонтальній так і у вертикальній площинах і найголовніше - швидкість (від 5000 вимірювань в секунду) і щільність (до десятків точок на 1 см^2 поверхні) [70].

Лазерне сканування дозволяє фіксувати абсолютно всі особливості інженерної споруди чи рельєфу, максимально швидко отримувати тривимірну візуалізацію навіть важкодоступних об'єктів. Для геодезичного моніторингу використовуються два види лазерного сканування: наземне і лазерне сканування з повітря. Наземне лазерне сканування дозволяє отримувати інформацію про об'єкт спостережень високого рівня деталізації для подальшого моніторингу деформацій споруд [15], а також створювати тривимірні моделі об'єктів для аналізу результатів моніторингу [77]. При лазерному скануванні з повітря лазерний сканер розміщують на літальному апараті, цей спосіб застосовують для побудови цифрових моделей рельєфу при спостереженнях за деформаціями земної поверхні [11]. Аналізуючи використання методу лазерного сканування для геодезичного моніторингу можна відзначити наступні переваги (рис 1.2):

- висока швидкість проведення вимірювань, та мінімальний час перебування у «польових умовах»;
- інформація одержана цим методом є наглядною та зручною для подальшого опрацювання;

Основним недоліком цього методу є:

- дискретність одержуваної інформації.

В основу ГНСС - методу покладено застосування глобальних навігаційних супутникових систем за допомогою яких можна отримати координати з міліметровою точністю в будь-якій точці земної поверхні, тобто дозволяє здійснювати моніторинг на глобальному, регіональному та локальному рівнях. Завдяки цьому цей метод набув широкої популярності при проведенні різного роду досліджень. На даний час існує мережа перманентних станцій розташованих по всій Землі. В результаті

спостережень ми отримуємо величини їх зсуву в горизонтальній і вертикальній площинах. Значною перевагою використання ГНСС методів є можливість спостерігати за змінами вертикальних рухів земної кори в реальному часі. Безперервні вимірювання ГНСС приймачів дають можливість визначати швидкість вертикального зміщення земної кори з СКП меншою, ніж ± 1 мм/рік [99, 125, 150, 166].

Методи ГНСС в останній час знайшли широке застосування в системах моніторингу територій розробки корисних копалин, об'єктів гідроенергетики, АЕС та інших унікальних споруд [38, 77, 136, 142, 143, 169].

В порівнянні з іншими методами геодезичного моніторингу методи ГНСС мають такі переваги (рис 1.2):

- безперервний моніторинг;
- висока точність та оперативність вимірів;
- дані ГНСС спостережень використовуються на усіх рівнях моніторингу (глобальний, регіональний, локальний) вертикальних зміщень;
- простота і висока ступінь автоматизації виконання вимірювань.

До недоліків ГНСС спостережень можна віднести:

- необхідність врахування зміни фазового центру антен на перманентних станціях при їх заміні;
- стійкість перманентних станцій;
- точковість результатів спостережень.

VLBI (Very long baseline interferometry) – це метод, який дозволяє вимірювати деформації на глобальному рівні, які викликані рухами тектонічних плит [163]. При застосуванні VLBI в геодезії вимірюється різниця між часом прибуття радіосигналу, який випускається з джерела у відкритому космосі (наприклад, квазарами чи радіогалактиками) на кожен з двох радіотелескопів [157]. Використання результатів VLBI для

визначення вертикальних зміщень має ряд переваг та недоліків. Перевагами цього методу є (рис 1.2):

- висока точність одержаних результатів.

Недоліками є:

- громіздкість і велика вартість обладнання;
- точковість інформації (відстань між VLBI станціями є тисячі кілометрів), тобто використання цього методу можливе лише на глобальному рівні.

Протягом останніх декількох десятиків років спостерігається інтенсивний розвиток таких методів супутникової геодезії як лазерна локація штучних супутників землі (SLR), доплерівська орбітографія (DORIS), але невелике число станцій, як у методі VLBI не дозволяє використовувати ці методи для моніторингу вертикальних зміщень техногенно-навантажених територій.

В практиці європейських країн, за останні десять років, для моніторингу деформаційних процесів поверхні Землі став широко застосовується метод InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). InSAR – це ефективна технологія геодезичних вимірів, яка дозволяє будувати ЦМР і проводити моніторинг вертикальних зміщень техногенно-навантажених територій за період від одного тижня до одного місяця з точністю 1 – 5 мм. Цей метод базується на знаходженні різниці фази коливань хвиль відбитих від поверхні, які повертаються на супутники на яких встановлені антени з синтезованою апертурою [56]. Основною ідеєю методу є формування інтерферограми, яка представляє собою результат комбінації двох радіолокаційних зображень однієї і тієї ж території, що містять інформацію про амплітуду і фази сигналу, і отриманих ідентичними радаром з близько розташованих точок орбіти [29]. Значною перевагою методу InSAR є те, він «працює» у хмарну погоду та в темний час доби. Прикладами використання InSAR є: дослідження сейсмічних процесів [120, 126, 133], моніторинг динаміки льодовиків [148, 131],

дослідження техногенно-навантажених територій (нафтові і газові родовища, шахтні поля, тунелі) [144, 62, 29]. Недоліком цього методу є висока вартість знімків, що ускладнює його використання на локальному рівні дослідження рухів земної кори [154].

Багато досліджень [132, 128, 155] показали високу степінь кореляції результатів швидкості руху земної поверхні, отриманих за даними InSAR та геодезичними методами. Це дозволяє використовувати цей метод у поєднанні з наземними геодезичними методами для районування техногенно-навантажених територій.

Перевагами цього методу є (рис 1.2):

- значна економічна ефективність при моніторингу великих територій земної поверхні;
- інформація одержана цим методом є наглядною та зручною для подальшого опрацювання;

До недоліків слід віднести:

- значну (на даний час) вартість знімків;
- невелику кількість супутників.

До дистанційних методів моніторингу вертикальних зміщень територій також відносяться аерокосмічні методи. В даний час існують два основні способи дистанційного отримання інформації про земну поверхню аерокосмічними методами: за допомогою оптичних і радіолокаційних систем. Оптичні системи (цифрові камери) використовують відбитий сонячне світло і тому сучасний аерознімальний комплекс вважаються пасивними системами. Радіолокаційні або радарні (RADIO Detecting And Ranging) системи використовують власне джерело випромінювання і називаються активними системами.

Для проведення аерокосмічного моніторингу техногенно-навантажених територій застосовуються різноманітні космічні апарати, повітряні засоби (літаки, вертольоти, безпілотні літальні апарати, дирижаблі), оснащених широким набором пасивної і активної апаратури

дистанційного зондування, що функціонує в різних діапазонах спектру електромагнітних хвиль (від УФ до радіодіапазону), а також геофізичною апаратурою, засобами зв'язку, наземними засоби прийому супутникових даних.

Аерокосмічні методи застосовуються для моніторингу техногенно-навантажених територій видобутку корисних копалин, об'єктів їх транспортування, тощо [22, 49, 89].

Аналізуючи використання аерокосмічних методів дистанційного зондування земної поверхні для геодезичного моніторингу можна зробити наступні висновки (рис 1.2):

- значна економічна ефективність при застосуванні для моніторингу великих територій земної поверхні;
- інформація одержана цим методом є наглядною та зручною для подальшого опрацювання;
- недоліки даного методу є низька точність одержуваної інформації.

Аналізуючи вищезгадані методи моніторингу вертикальних зміщень можна зробити наступні висновки (табл. 1.1):

- ні один з цих методів не є універсальним і має як переваги так і недоліки, тому для моніторингу вертикальних зміщень техногенно-навантажених територій доцільно використовувати поєднання різноманітних геодезичних та геотехнічних методів спостережень;
- найбільш ефективним методом моніторингу вертикальних зміщень техногенно-навантажених територій є ГНСС метод;
- альтернативою цьому методу в подальшому повинен стати метод InSAR (при здешевленні вартості знімків);
- за даними наземних геодезичних методів можна вирішувати задачі проведення районування досліджуваних територій по

спільним кінематичним характеристиками у разі розробки відповідних методик.

- високоточні геотехнічні прилади (цифрові інклінометри) можуть знайти використання у моніторингу вертикальних зміщень для визначення фонових (в межах жорсткої моделі) нахилів земної поверхні.

Таблиця 1. 1

Порівняння геодезичних методів моніторингу вертикальних зміщень

■ – задовольняє вимогам ■ - не задовольняє вимогам ■ частково задовольняє)

Метод моніторингу	Вимоги відповідності				
	точність	перманентність вимірювання	час на проведення роботи	можливість застосування на різних рівнях моніторингу	економічна ефективність
Геометричне нівелювання					
Тригонометричне нівелювання					
Гідро нівелювання					
Мікро нівелювання					
Фотограмметричні методи					
Лазерне сканування					
Аерокосмічні методи					
ГНСС – метод					
InSAR					
VLBI					

1.3 Методи опрацювання кінематичних мереж

Інженерно-геодезичні мережі, які створюють на техногенних геодинамічних полігонах відносять до кінематичних мереж. Кінематичними вважають мережі з безперервною зміною в часі просторового положення її пунктів за умови, якщо СКП визначення координат є вищою ніж величина їх зміщень. Важливою проблемою, при опрацюванні таких мереж, є визначення дійсного просторового положення пунктів та їх стійкості.

На сьогоднішній час існує багато методів визначення стійкості пунктів. Але при застосуванні цих методів до однієї і тої ж мережі нерідко одержують різні результати стійкості положення пунктів. Це відбувається внаслідок того, що при опрацюванні кінематичних мереж вихідну поверхню, яку як правило вважають нерухомою. Насправді, в наслідок ендогенних та екзогенних факторів, вихідна поверхня зазнає зміщень в просторі [32]. Крім того запропоновані методи не завжди можна використати для якоїсь конкретної мережі [18, 116]. Методи визначення стійкості положення пунктів кінематичних мереж для спостереження за деформаціями та зміщеннями розглянуті у підручниках, монографіях [4, 52, 71, 160], а також у статтях та дисертаційних роботах [16, 75].

За [75] мережі можна розділити на дві групи:

- статичні мережі,
- мережі змінні в часі.

Для статичних мереж використовуються методи, які поділяють на дві групи [18] в основу яких покладено наступні принципи: незмінність положення найбільш стійкого пункту та незмінність середнього положення всіх пунктів мережі або групи найбільш стійких пунктів.

Методи в які покладено принцип незмінності положення найбільш стійкого пункту мережі рекомендовані у нормативних документах по опрацюванню спостережень за зміщеннями промислових споруд [29, 23, 61]. Детально ці методи розглянуті в [18, 33].

Друга група методів умовно поділяється на дві підгрупи в які покладено принцип незмінності середньої висоти усіх пунктів, або незмінності середньої висоти групи найбільш стійких пунктів [18, 63].

Аналізуючи ці методи можна зробити наступні висновки. Метод А. Д. Соловйова [18] не є наочним і розрахований не більше ніж на три вихідних пункти, що дуже рідко зустрічається на практиці. Метод А. Костехеля [18] при використанні сучасних комп'ютерних програм - простий і зручний. Але, нерідко, в різних циклах спостережень, вихідними є різні пункти, що ускладнює аналіз осідань цим методом. У методі Г. К. Ботяна [18] приймається, що величини зміщень пунктів завідомо від'ємні, але в умовах промислових об'єктів пункти зазнають не тільки осідання, але і підйому. Метод І. В. Рунова [18] має ті ж недоліки, що й метод А. Костехеля В методах В. Ф. Чернікова, Б. Готца, В. В. Попова, П. Марчака [18] застосовується принцип незмінності середнього положення всіх пунктів мережі, або групи найбільш стійких пунктів, але середнє положення спотворюється величинами зміщень пунктів, які не є стійкими.

Методи з рухомою у часі поверхнею відносності отримали назви університетів, у яких вони були розроблені (Гановерський, Карлсруе, Мюнхенський, Дармштадт). Описи цих методів свідчать про застосування складних математичних апаратів апроксимації просторового розподілу вертикальних зміщень, статистичного аналізу та фільтрування вимірів, застосування геологічної інформації про стійкість пунктів. В [146] перевірка цих методів на моделях виявила їх невисоку ефективність при відсутності наближеної апріорної інформації про кінематику мережі.

Для опрацювання просторових кінематичних мереж застосовуються методи аналогічні за своїм фізичним змістом. Відмінність визначення стійкості пунктів просторових мереж полягає у знаходженні відповідних значень проекції виміряних векторів на відповідні координатні осі Δx , Δy , Δz відносно умовно нерухомого пункту чи групи таких пунктів, або центра ваги мережі [18].

В роботі [68] при контролі стійкості пунктів мережі використовуються основні властивості трикутника і його «чотирьох чудових точок». Зміщення пункту мережі виявляється при зміні площі, центру ваги, ортоцентра, радіусів описаного і вписаного кіл в трикутник за результатами суміжних циклів вимірювань. Очевидно, що для реалізації запропонованого способу контролю стійкості пунктів, необхідно створювати мережу у вигляді трикутників, що не завжди є можливим.

В роботі [95] розглянуто способи оперативного контролю стійкості пунктів, що проводяться в кожному циклі вимірювань. Для реалізації способу необхідно виконати лінійно-кутові вимірювання між пунктами і оцінювати їх стійкість, шляхом порівняння значень, отриманих у суміжних циклах вимірювань.

В роботі [60] розглянуті питання, пов'язані з комплексними дослідженнями осідань інженерних споруд, виміряних геодезичними методами. Запропоновано методи визначення стійкості споруд, засновані на математичному апараті дисперсійного та кореляційного аналізів. Детально розглянуто математичне моделювання та прогнозування осідань, що виконується за даними геологічних, гідрологічних вишукувань і геодезичних вимірювань. Запропоновано строга теорія обґрунтування точності і періодичності геодезичних спостережень за осіданнями інженерних споруд.

В роботі [2] контроль стійкості пунктів опорної планової геодезичної мережі, запропоновано здійснювати на основі обчислення зміщень пунктів між циклами спостережень. Це реалізується шляхом перетворення координат пунктів мережі поточного циклу спостережень у координати вихідного циклу спостережень та послідовного виключення пунктів, зміщення яких перевищують граничні помилки їх визначення.

Основна розбіжність розглянутих методів полягає у визначенні зміни СППМ між циклами спостережень, яке виникає в результаті сумарного просторового зміщення усіх пунктів мережі.

1.4 Застосування цифрових інклінометрів для моніторингу нахилів земної поверхні

Для моніторингу нахилів земної поверхні чи локальних об'єктів на ній, і що особливо важливо для кількісної оцінки величини, швидкості та напрямку руху, останнім часом у світовій практиці почали використовувати цифрові інклінометри. Інклінометр (з латинської *incline*-нахиляю і *metreo*-вимірюю) прилад для виміру кутів нахилу. За принципом дії інклінометри можна розділити на аналогові та цифрові (рис. 1.3). До аналогових інклінометрів відносяться магнітні, гіроскопічні, маятникові, фотоінклінометри. Аналогові інклінометри використовувалися у гірничій справі, на нафтових та газових родовищах тощо.

В геодезичній практиці переважно використовуються цифрові інклінометри, які поділяються на два типи:

- інклінометри у яких покладено принцип фіксації електропровідності (електролітичні);
- інклінометри з оптико-електронною реєстрацією сигналу.

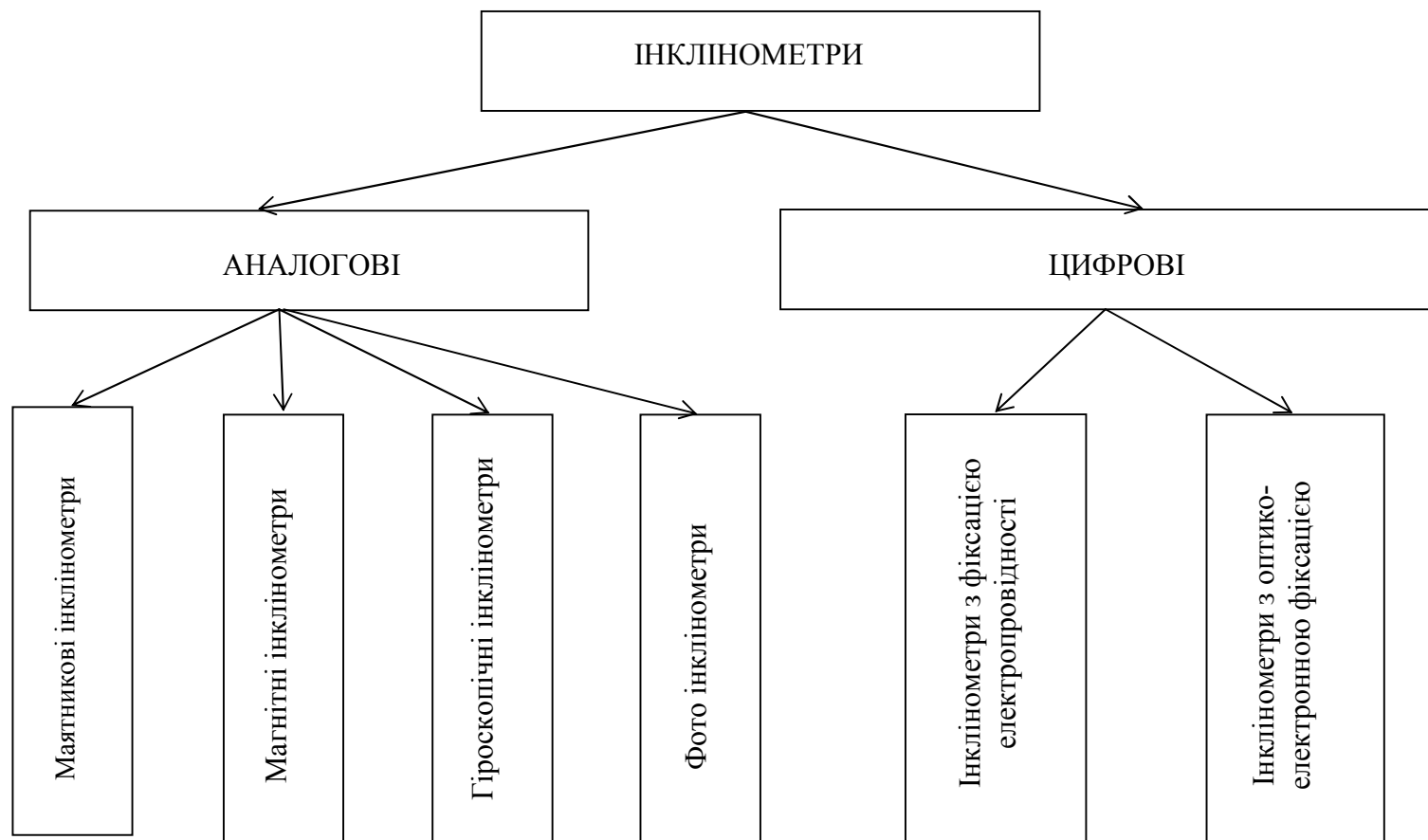


Рис. 1.3 Класифікація інклінометрів за принципом дії

Електролітичні інклінометри характеризуються наступними характеристиками:

Таблиця 1.2

Технічні характеристики електролітичних інклінометрів

Діапазон виміру кута нахилу	$5^{\circ} - 30^{\circ}$
Максимальна похибка виміру кута нахилу	$0,01^{\circ} - 0,2^{\circ}$
Діапазон робочих температур	$-20 \dots +50^{\circ} \text{C}$

Цей принцип виміру кута нахилу знайшов реалізацію в інклінометрах наступних фірм – виробників HL-Planartechnik Gmb, Seika Mikrosystemtechnik Gmb, Fraba Posital GmbH, ТОВ "Мікросенсорні технології", The Fredericks Company та інші.

Принцип роботи інклінометрів другого типу – оптико-електронна реєстрація сигналу всередині приладу, який реалізований фірмою «Leica» в рідинному компенсаторі кута нахилу електронних тахеометрів [152].

До переваг саме оптико-електронного принципу слід віднести той факт, що він забезпечує безперервну реєстрацію кутів нахилу у двох площинах з точністю 0,005 мрад (в градусні мірі становить – 1"). Такі цифрові інклінометри характеризуються наступними характеристиками:

Таблиця 1.3

Технічні характеристики інклінометрів з оптико - електронною реєстрацією сигналу

Діапазон виміру кута нахилу	$300'' \dots 600''$
Максимальна похибка виміру кута нахилу	$1'' \dots 10''$
Діапазон робочих температур	$-20 \dots +50^{\circ} \text{C}$

Серед цього типу приладів варто виділити цифрові інклінометри фірми «Leica Geosystems AG» серії NIVEL 200.

Аналізуючи таблиці 1.2, 1.3 можна зробити висновок, що діапазон виміру кута нахилу та точність виміру кута мають обернену залежність (зростання точності виміру кута зменшує діапазон виміру, і навпаки). Ця залежність стала визначальною для сфери застосування цифрових інклінометрів.

Електролітичні інклінометри переважно використовуються в гірничій справі для вимірювання зенітного кута (кута нахилу) та азимута осі бурових свердловин [50, 105]. Крім того, такі інклінометри знайшли широке використання при будівництві тунелів, вивченні сейсмічних та вулканічних територій, а також районів видобутку корисних копалин [7, 118, 165]. Так, при будівництві тунелів інклінометри використовуються для визначення деформацій масиву ґрунту, в якому він прокладається. При вивченні територій, які зазнали значних деформацій внаслідок техногенного впливу, застосування інклінометрів дає змогу одержувати інформацію, про величину просідань споруд розміщених на цих територіях. Використання інклінометрів у поєднанні з акселерометрами та термопарами дозволяє проводити вивчення поведінки висотних споруд (вітряки, щогли, антенні вежі та інше) під час динамічних навантажень [139, 159]. Останнім часом, інклінометри почали використовувати в сільському господарстві для точного позиціонування механізмів (оприскувачів, комбайнів), в медицині для встановлення надточного медичного обладнання (магнітно-резонансних томографів та іншого прецизійного обладнання), в системах керування сонячними панелями, для збільшення виробництва сонячної енергії [170].

Інклінометри другого типу використовуються для безперервних або періодичних спостережень (моніторингу) за просторовим положенням мостових конструкцій, висотних будівель, гребель гідротехнічних споруд та пілонів базових станцій ГНСС [114, 117, 143]. Так, для контролю мостових конструкцій інклінометри об'єднуються в вимірювальну мережу системи безперервного деформаційного моніторингу, яка дозволяє проводити збір, опрацювання та зберігання даних, а також надавати отриману інформацію

для подальшого аналізу. Безперервний деформаційний моніторинг мостової конструкції дозволяє здійснити діагностику стану як в статичному, так і в динамічному режимі (під час проходження транспорту чи впливу зовнішніх факторів) [124, 168]. Використання інклінометрів під час будівництва та експлуатації висотних будівель дає можливість одержувати інформацію про нахили осей будівлі на різних горизонтах, та порівнювати їх з критично допустимими [122, 172]. Застосування інклінометрів для контролю стану гідротехнічних споруд, в процесі їх експлуатації, у поєднанні з геодезичними методами вимірювань (електронні тахеометри, супутникові системи позиціонування, високоточне геометричне та гідростатичне нівелювання) дозволяє пришвидшити та автоматизувати процес збору інформації [153].

Крім того, цифрові інклінометри знайшли широке використання для контролю стану окремих частин будівельних конструкцій (ферм, балок перекриття, тощо) [141], а також для встановлення в проектне положення високоточного астрономо – геодезичного обладнання (телескопи, зеніт-камери) [145]. Останнім часом цифрові інклінометри другого типу почали застосовуватися для геодезичного моніторингу на територіях гірничих підприємств з видобутку твердих корисних копалин [138, 140].

Безумовно використання цифрових інклінометрів для таких цілей ускладнене деякими факторами. По-перше, в даний час відсутні детально задокументовані методи створення таких систем моніторингу, що перешкоджає їх подальшому розвитку. По-друге, існуючі системи моніторингу передбачають лише визначення критичних деформацій, в той час як інформації що надходить достатньо для проведення глибокого аналізу [107].

Аналізуючи застосування високоточних цифрових інклінометрів в геодезичній практиці можна зробити наступні висновки: інклінометри до останнього часу в основному використовувалися переважно для визначення кутів нахилу конструкції, як самостійно, так і у поєднанні з іншими геодезичними методами (лінійно-кутові мережі, ГНСС метод). Це суттєво

обмежує можливості використання інклінометрів, особливо при проведенні моніторингу техногенно-навантажених територій. Одержання безперервної інформації цифровими інклінометрами дозволяє проводити перманентний моніторинг стану, як вихідної мережі так і безпосередньо території на якій здійснюється моніторинг. Для цього необхідно розробити методику опрацювання вимірів одержаних цифровими інклінометрами, та (наприклад) даними високоточного геометричного нівелювання. Це дасть можливість одержувати додаткову інформацію про кінематичні характеристики геодезичних мереж, а також здійснювати районування території.

Висновки до розділу 1

1. Проведений аналіз методів вимірювання на геодинамічних полігонах, підтверджує важливість і необхідність ведення комплексного моніторингу вертикальних деформацій земної поверхні на цих територіях геодезичними та геотехнічними методами, з врахуванням впливу геодинамічних процесів, які відбуваються на цих територіях, для мінімізації техногенної небезпеки.
2. Аналізуючи геодезичні методи ведення моніторингу вертикальних зміщень техногенно-навантажених територій визначено їх переваги та недоліки. Встановлено, що основним недоліком цих методів є дискретність та точковість одержуваної інформації, що в свою чергу знижує оперативність контролю за деформаційними процесами та обмежує можливість їх подальшого прогнозування.
3. На основі проведеного аналізу встановлено, що основними недоліками існуючих методів опрацювання кінематичних мереж є:
 - застосування методик опрацювання мереж, які знаходять реалізацію для якоїсь конкретної мережі;
 - використання математичного апарату, який опрацьовує геодезичні виміри у вільній, а не кінематичній мережі, яка постійно змінюється в часі;

- за результатами спостережень відсутня достовірна інформація про стан мережі між циклами спостережень.
4. Розглянуто можливість застосування цифрових інклінометрів для моніторингу нахилу земної поверхні та технологічного обладнання. Наведено поділ цифрових інклінометрів за принципом роботи та за технічними характеристиками, а також встановлена залежність між ними. Зроблені висновки про подальші напрямки використання цифрових інклінометрів в системах моніторингу техногенно-навантажених територій.

РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ РАЙОНУВАННЯ ТЕРИТОРІЇ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Безпека експлуатації інженерних споруд на техногенно-навантажених територіях вимагає періодичного ведення їх моніторингу, а саме визначення просторових зміщень. Моніторинг просторових зміщень потребує застосування високоточних геодезичних методів і засобів вимірювань. Успіх робіт з моніторингу просторових зміщень буде досягнуто лише тоді, коли результати вимірів у геодезичних мережах забезпечуватимуть достовірний контроль деформаційних процесів на земній поверхні та встановлюватимуть причини їх появи.

В залежності від місця розташування техногенно-навантаженої території на Землі вплив геодинамічних процесів може проявлятися як на глобальному, так і на регіональному чи локальному рівнях. У зв'язку з цим, необхідно розділяти методику проведення досліджень, вибір приладів для врахування усіх факторів впливу геодинамічних явищ в залежності від розташування техногенно-навантаженої території. Важливе значення для здійснення досліджень за регіональними та глобальними геодинамічними процесами є встановлення системи відліку координат.

При цьому, значною проблемою є реальні відомості про вихідну геодезичну основу для контролю деформаційних процесів, тобто інформація про стійкість пунктів вихідної основи. Достовірний контроль деформаційних процесів та встановлення причини їх появи можливий при застосуванні теоретично обґрунтованої з позицій кінематики, методики опрацювання кінематичних геодезичних мереж, та фільтрації впливів різної фізичної природи на появи деформаційних процесів [97].

2.1 Модифікація методики опрацювання кінематичних мереж для ГНСС – вимірів

В роботі [97] теоретично обґрунтована методика опрацювання висотних кінематичних мереж з врахуванням зміщення СВМ, викликаною деформацією мережі.

Відмінність методики опрацювання кінематичних мереж для ГНСС – вимірів від методики опрацювання висотних кінематичних мереж у тому, що визначення деформації мережі буде здійснюватися за просторовими координатами. Тобто, опрацювання мережі проводиться з врахуванням СППМ. Реалізація цієї методики виконується послідовно для кожного повторного циклу спостережень. За результатами опрацювання повторних циклів спостережень ми визначаємо незалежно від способу зрівноваження зміну проєкцій векторів $\delta x_{i,j}, \delta y_{i,j}, \delta z_{i,j}$, де i та j - номери пунктів початку та кінця вектора. Відповідно:

$$\begin{aligned}\delta x_{i,j} &= \Delta X_j - \Delta X_i; \\ \delta y_{i,j} &= \Delta Y_j - \Delta Y_i; \\ \delta z_{i,j} &= \Delta Z_j - \Delta Z_i,\end{aligned}\tag{2.1}$$

де $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ – проєкції зміщення відповідних пунктів мережі.

Оскільки для дослідження деформацій кінематичної просторової мережі необхідно провести ряд послідовних циклів спостережень то на параметри $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ у рівнянні (2.1) можна накласти умову:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta X_i}{\Delta X_j} &= \frac{Kx_i}{Kx_j}, \\ \frac{\Delta Y_i}{\Delta Y_j} &= \frac{Ky_i}{Ky_j}, \\ \frac{\Delta Z_i}{\Delta Z_j} &= \frac{Kz_i}{Kz_j},\end{aligned}\tag{2.2}$$

де $Kx_i, Kx_j, Ky_i, Ky_j, Kz_i, Kz_j$ - коефіцієнти, які характеризують кінематику, або інтенсивність зміни відповідних проекцій векторів протягом певної кількості циклів спостережень.

Ця умова доведена у роботі [97] для висотних кінематичних мереж. Для зручності введемо поняття «нормований коефіцієнт кінематики» Kx_r, Ky_r, Kz_r , який змінюється в межах від 0 до 1. Ці коефіцієнти можна розрахувати за наступною залежністю:

$$\begin{aligned} Kx_r &= \frac{Rx_r}{\sum_{u=1}^n Rx_u}; \\ Ky_r &= \frac{Ry_r}{\sum_{u=1}^n Ry_u}; \\ Kz_r &= \frac{Rz_r}{\sum_{u=1}^n Rz_u}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

де Rx_r, Ry_r, Rz_r - ненормовані кінематичні коефіцієнти відповідних проекцій векторів для пункту r , u - порядковий номер циклу спостережень, n - кількість циклів спостережень.

Ненормовані коефіцієнти розрахуємо за залежністю:

$$\begin{aligned} Rx_r &= \frac{\sum_{\substack{t=1 \\ t \neq r}}^n \nabla x_{r,t}}{n}; \\ Ry_r &= \frac{\sum_{\substack{t=1 \\ t \neq r}}^n \nabla y_{r,t}}{n}; \\ Rz_r &= \frac{\sum_{\substack{t=1 \\ t \neq r}}^n \nabla z_{r,t}}{n}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

де $\nabla x_{r,t}, \nabla y_{r,t}, \nabla z_{r,t}$ - середні квадратичні відхили кожної проекції вектора між пунктами r та t від його середньої величини за весь або певний період попередніх спостережень, який обчислюється за наступною залежністю:

$$\begin{aligned}
\nabla x_{r,t}^k &= \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^k \left(\nabla x_{r,t}^l - \frac{\sum_{l=1}^k \nabla x_{r,t}^l}{k} \right)^2}{k}}; \\
\nabla y_{r,t}^k &= \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^k \left(\nabla y_{r,t}^l - \frac{\sum_{l=1}^k \nabla y_{r,t}^l}{k} \right)^2}{k}}; \\
\nabla z_{r,t}^k &= \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^k \left(\nabla z_{r,t}^l - \frac{\sum_{l=1}^k \nabla z_{r,t}^l}{k} \right)^2}{k}},
\end{aligned} \tag{2.5}$$

де k - порядковий номер останнього циклу спостережень, l - порядковий номер поточного циклу спостережень.

Згідно (2.1) перейдемо до середніх квадратичних відхилів:

$$\begin{aligned}
\nabla x_{i,j} &= \nabla X_r - \nabla X_t; \\
\nabla y_{i,j} &= \nabla Y_r - \nabla Y_t; \\
\nabla z_{i,j} &= \nabla Z_r - \nabla Z_t,
\end{aligned} \tag{2.6}$$

де $\nabla X_r, \nabla X_t, \nabla Y_r, \nabla Y_t, \nabla Z_r, \nabla Z_t$ - середні квадратичні відхили зміни проекцій векторів між пунктами r та t .

В роботі [97] доведено, що при достатній та рівномірній частоті циклів спостережень зміщення пунктів відбувається за лінійним законом і $\nabla X, \nabla Y, \nabla Z$ можна замінити відповідно на $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$.

Для визначення зміщення пунктів мережі, пов'язаних з деформацією мережі, введемо поняття середнього вагового зміщення по осях координат X, Y та Z кожної пари пунктів із врахуванням кінематичних коефіцієнтів:

$$\begin{aligned}
Dx_{i,j} &= \frac{(Kx_j - Kx_i) \delta x_{ij}}{2(Kx_j + Kx_i)}; \\
Dy_{i,j} &= \frac{(Ky_j - Ky_i) \delta y_{ij}}{2(Ky_j + Ky_i)}; \\
Dz_{i,j} &= \frac{(Kz_j - Kz_i) \delta z_{ij}}{2(Kz_j + Kz_i)},
\end{aligned} \tag{2.7}$$

де $\delta x_{ij}, \delta y_{ij}, \delta z_{ij}$ – проекції зміщення на відповідні координатні осі довжини вектора між парою пунктів i та j .

Середнє вагове зміщення вздовж осей координат X, Y та Z кожної пари пунктів характеризує зміну величини центра проекції пунктів мережі. Відповідно зміну СППМ, викликану її деформацією, запишемо як:

$$\begin{aligned}\delta\delta_x &= \frac{2\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^n Dx_{i,j}}{n(n-1)} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i}{n}; \\ \delta\delta_y &= \frac{2\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^n Dy_{i,j}}{n(n-1)} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta Y_i}{n}; \\ \delta\delta_z &= \frac{2\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^n Dz_{i,j}}{n(n-1)} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta Z_i}{n}.\end{aligned}\quad (2.8)$$

Величин $\delta\delta_x, \delta\delta_y, \delta\delta_z$ називаються середньо ваговим зміщенням усієї мережі у відповідній проекції.

Далі за результатами класичного зрівноваження визначають зміщення пунктів $\Delta X_i^{yp}, \Delta Y_i^{yp}, \Delta Z_i^{yp}$ і відповідно зміщення СППМ за результатами зрівноваження:

$$\begin{aligned}\Delta\Delta_x &= \frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i^{yp}}{n}; \\ \Delta\Delta_y &= \frac{\sum_{i=1}^n \Delta Y_i^{yp}}{n}; \\ \Delta\Delta_z &= \frac{\sum_{i=1}^n \Delta Z_i^{yp}}{n}.\end{aligned}\quad (2.9)$$

Кінцеві зміщення пунктів:

$$\begin{aligned}\delta X_i &= \Delta X_i^{yp} - (\Delta\Delta_x - \delta\delta_x); \\ \delta Y_i &= \Delta Y_i^{yp} - (\Delta\Delta_y - \delta\delta_y); \\ \delta Z_i &= \Delta Z_i^{yp} - (\Delta\Delta_z - \delta\delta_z).\end{aligned}\quad (2.10)$$

Оцінку точності результатів опрацювання спостережень виконують наступним чином. Спочатку, за результатами зрівноваження кожного циклу отримують СКП визначення координат відносно жорсткого пункту:

$$\begin{aligned}
m_{Xi}^I &= \mu \sqrt{Q_{Xii}}; \\
m_{Yi}^I &= \mu \sqrt{Q_{Yii}}; \\
m_{Zi}^I &= \mu \sqrt{Q_{Zii}},
\end{aligned} \tag{2.11}$$

де $Q_{Xii}, Q_{Yii}, Q_{Zii}$ - відповідні діагональні елементи коваріаційної матриці вимірів.

Крім цього, обчислюємо середню квадратичну кінематичну похибку визначення просторового положення i -го пункту в циклі l :

$$\begin{aligned}
\overline{m_{Xi}^l} &= \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\delta X_i - \Delta X_i^{ij})^2}{s}}; \\
\overline{m_{Yi}^l} &= \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\delta Y_i - \Delta Y_i^{ij})^2}{s}}; \\
\overline{m_{Zi}^l} &= \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\delta Z_i - \Delta Z_i^{ij})^2}{s}} \quad j \neq i, j \in I,
\end{aligned} \tag{2.12}$$

де I, s - відповідно множина й кількість пунктів, до яких виконано виміри з пункту i .

СКП положення координат пунктів у циклі l відносно першого циклу спостережень із врахуванням похибок вимірів і похибок кінематики мережі розраховуємо за наступними виразами:

$$\begin{aligned}
\overline{\overline{m_{Xi}^l}} &= \sqrt{\left(\overline{m_{Xi}^I}\right)^2 + \left(\overline{m_{Xi}^l}\right)^2 + \sum_{k=2}^l \left(\overline{m_{Xi}^k}\right)^2}; \\
\overline{\overline{m_{Yi}^l}} &= \sqrt{\left(\overline{m_{Yi}^I}\right)^2 + \left(\overline{m_{Yi}^l}\right)^2 + \sum_{k=2}^l \left(\overline{m_{Yi}^k}\right)^2}; \\
\overline{\overline{m_{Zi}^l}} &= \sqrt{\left(\overline{m_{Zi}^I}\right)^2 + \left(\overline{m_{Zi}^l}\right)^2 + \sum_{k=2}^l \left(\overline{m_{Zi}^k}\right)^2}.
\end{aligned} \tag{2.13}$$

СКП положення кожного пункту буде дорівнювати:

$$\overline{\overline{m_i^{l,l}}} = \sqrt{\left(\overline{\overline{m_{Xi}^{l,l}}}\right)^2 + \left(\overline{\overline{m_{Yi}^{l,l}}}\right)^2 + \left(\overline{\overline{m_{Zi}^{l,l}}}\right)^2}. \tag{2.14}$$

2.2 Реалізація методики опрацювання кінематичних мереж для ГНСС – вимірів на прикладі опорної мережі системи автоматизованого геодезичного моніторингу інженерних споруд Канівської ГЕС

Представлену в пункті 2.1 методику і алгоритм обчислень нами реалізовано програмному пакеті MATHCAD. Продемонструємо методику опрацювання кінематичних мереж для ГНСС – вимірів на прикладі опорної мережі системи автоматизованого геодезичного моніторингу інженерних споруд Канівської ГЕС [98]. Вихідними даними для опрацювання були добові файли спостережень 77 векторів мережі (рис. 2.1) одержані за березень 2014 року. Найменший вектор мережі рівний 43 метрам, а найбільший – 730 метра. Всього для опрацювання використано 29 добових файлів (циклів спостережень). Зміни довжин векторів між циклами спостережень знаходяться в межах від 1,5 мм (вектор R2G – PP2), до 15 мм (R1G – MP3). Динаміка зміни довжин цих векторів приведена на рис. 2.2.

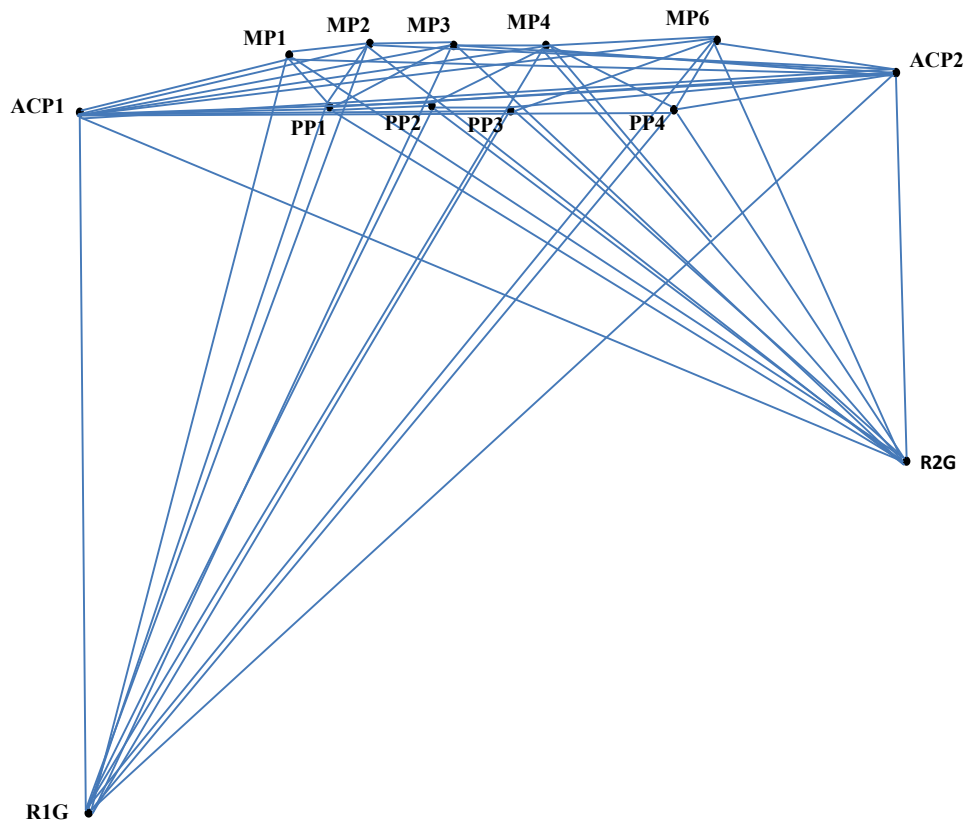


Рис. 2.1. Схема опорної мережі ГНСС – спостережень на Канівській ГЕС

Опрацювання першого циклу спостережень виконується класичним параметричним методом зрівноваження. За результатами наступного циклу вимірів Δx , Δy , Δz знову виконують зрівноваження параметричним методом. За вихідний у кожному циклі спостережень був вибраний один і той же пункт (PP4). Для зрівноваження за наближені координати пунктів приймають координати одержані у попередньому циклі спостережень.

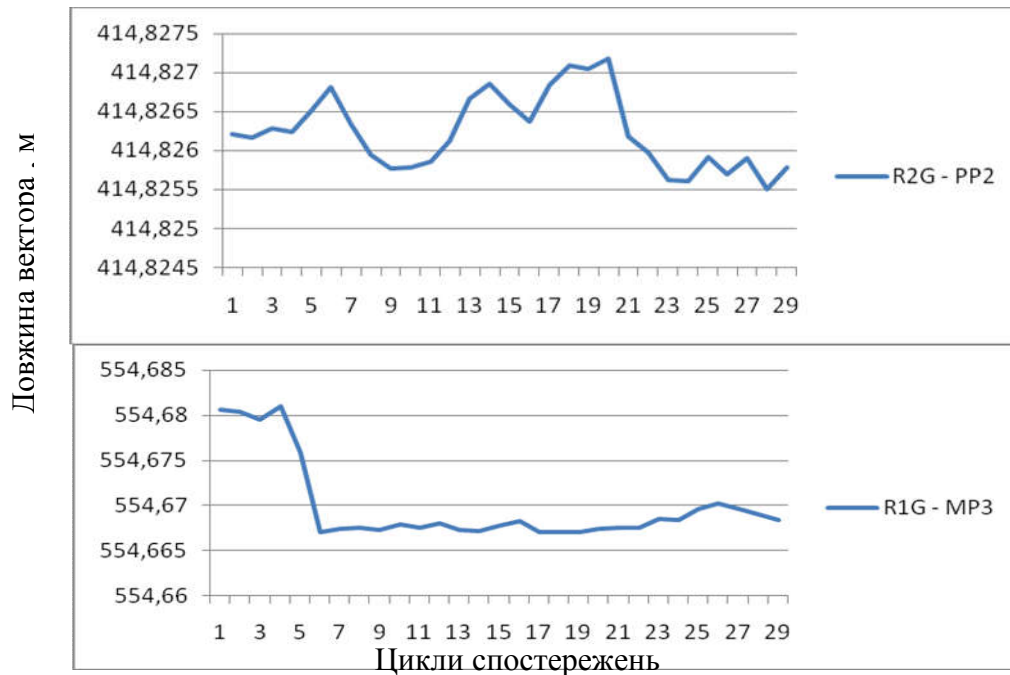


Рис. 2.2. Динаміка зміни довжин векторів з найбільшою (вектор R1G – MP3) та найменшою (вектор R2G – PP2) різницею (м)

Після зрівноваження кожного циклу спостережень визначаємо зміщення для кожного пункту (за винятком вихідного) $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$. За результатами зрівноваження мережі параметричним способом одержуємо зміщення просторового положення пунктів мережі відносно попереднього циклу спостережень які приведені в таблиці 2.1 (для зручності тут і надалі результати приведені тільки для 1, 5, 10, 20, 29 циклу спостережень).

Усі подальші обчислення виконуються окремо для кожного циклу спостережень. За виміряними у попередніх циклах проєкцій векторів Δx , Δy , Δz знаходять середній квадратичний відхил кожної проєкції вектора між пунктами від його середньої величини за весь період попередніх спостережень $\nabla x, \nabla y, \nabla z$.

Таблиця 2.1

Просторові зміщення $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ пунктів отримані з зрівноваження мережі (мм) (пункт РР4 прийнятий за вихідний)

Назва пунктів	Номера циклів вимірювань														
	1			5			10			20			29		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
R1G	-0.17	-0.07	0.02	0.49	0.14	0.30	-0.12	0.08	-0.27	-0.48	0.10	0.02	0.04	-0.08	-0.72
R2G	0.24	0.11	0.10	0.85	0.22	-0.45	-0.05	-0.09	0.25	-0.27	0.13	-0.08	-0.27	-0.37	0.08
АСР1	-0.27	-0.00	-0.20	0.73	-1.51	0.32	0.03	-0.08	-0.02	-0.14	0.39	0.17	1,99	-2.63	0.29
АСР2	0.33	-0.08	-0.25	0.41	0.25	0.20	0.03	-0.28	0.27	-0.29	0.44	0.15	-0.06	-0.39	0.47
MP1	-0.12	-0.01	-0.08	-0.15	-0.44	-0.42	-0.13	-0.11	0.19	0.27	0.42	0.65	0.23	1,02	-0.76
MP2	-0.24	0.06	-0.14	1,37	-0.29	-1.85	0.29	0.10	0.04	-0.73	0.35	0.61	-0.03	0.75	-0.57
MP3	-0.40	0.73	-0.68	0.73	2,44	-3.85	0.16	-0.18	0.24	-0.47	0.23	0.53	-0.27	0.73	-0.63
MP4	-0.23	-0.24	-0.05	-0.01	-0.36	0.10	0.20	-0.04	0.13	-0.82	0.14	0.32	-0.39	0.14	0.05
MP6	-0.15	0.06	-0.27	0.10	-0.38	0.02	0.24	-0.03	0.01	-0.46	0.35	0.29	-0.45	-0.12	-0.04
PP1	-0.17	-0.14	0.13	0.17	0.02	-0.45	0.20	0.02	0.12	-0.11	0.34	0.06	0.10	0.09	0.59
PP2	-0.06	-0.24	-0.02	0.10	0.14	-0.25	-0.29	-0.36	0.13	-0.10	0.20	0.40	-0.02	-0.11	0.32
PP3	-0.13	0.05	-0.05	0.40	0.18	0.37	0.38	-0.04	0.12	-0.29	0.03	-0.15	-0.03	0.00	-0.06

Далі за результатами обчислень $\nabla x, \nabla y, \nabla z$ для кожної проекції пунктів за виразами (2.4) знаходимо ненормовані кінематичні коефіцієнти Rx_r, Ry_r, Rz_r , після чого за виразами (2.3) обчислюємо значення нормованих кінематичних коефіцієнтів Kx_r, Ky_r, Kz_r значення яких приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Значення нормованих кінематичних коефіцієнтів Kx_r, Ky_r, Kz_r

Назва пунктів	Номера циклів вимірювань											
	5			10			20			29		
	Kx_r	Ky_r	Kz_r	Kx_r	Ky_r	Kz_r	Kx_r	Ky_r	Kz_r	Kx_r	Ky_r	Kz_r
R1G	0,17	0,21	0,04	0,19	0,25	0,01	0,15	0,19	0,04	0,13	0,15	0,05
R2G	0,06	0,02	0,02	0,03	0,05	0,03	0,05	0,04	0,05	0,06	0,04	0,05
АСР1	0,02	0,02	0,06	0,03	0,01	0,03	0,05	0,1	0,02	0,07	0,08	0,02
АСР2	0,01	0,06	0,04	0,04	0,04	0,02	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05
МР1	0,02	0,01	0,03	0,06	0,01	0,02	0,09	0,03	0,03	0,1	0,04	0,04
МР2	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03
МР3	0,02	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,07	0,07
МР4	0,04	0,02	0,05	0,04	0,01	0,02	0,05	0,02	0,03	0,05	0,05	0,04
МР6	0,32	0,31	0,52	0,31	0,25	0,72	0,23	0,18	0,54	0,18	0,16	0,44
РР1	0,03	0,03	0,05	0,01	0,04	0,02	0,04	0,06	0,04	0,05	0,08	0,06
РР2	0,07	0,04	0,06	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,07	0,07
РР3	0,18	0,2	0,03	0,16	0,24	0,02	0,15	0,19	0,04	0,14	0,16	0,04
РР4	0,03	0,02	0,03	0,05	0,02	0,04	0,05	0,02	0,05	0,07	0,01	0,05

Для кожної пари пунктів за виразом (2.7) розраховуються середньо вагові зміщення по осях координат X, Y та Z . За виразами (2.8) та (2.9) визначаємо середньо вагове зміщення всієї мережі $\delta\delta_x, \delta\delta_y, \delta\delta_z$ і зміщення СППМ за результатами зрівноваження а $\Delta\Delta_x, \Delta\Delta_y, \Delta\Delta_z$ також остаточні координати точок мережі у всіх циклах спостережень. Результати визначення координат точок приведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Остаточні координати точок (мм)

Назва пунктів	Номера циклів вимірювань								
	1			5			10		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
R1G	856807,87	5376175,52	5801632,17	856808,08	5376175,68	5801632,43	856807,90	5376176,10	5801633,61
R2G	376093,39	5332301,49	6168471,09	376093,48	5332301,67	6168470,87	376093,95	5332301,25	6168470,76
ACP1	839317,21	4972214,85	6005673,89	839317,81	4972213,34	6005674,12	839322,98	4972208,87	6005675,32
ACP2	381497,24	5107002,58	6279906,95	381496,66	5107002,73	6279907,45	381496,22	5107002,03	6279909,68
MP1	729731,28	4970706,95	6086122,94	729730,85	4970706,36	6086123,19	729730,84	4970707,04	6086123,13
MP2	682228,38	4984831,05	6114130,03	682230,20	4984830,75	6114128,62	682230,61	4984831,76	6114129,16
MP3	634776,12	4998943,58	6142314,19	634776,29	4998946,20	6142313,00	634766,69	4998949,43	6142300,12
MP4	586951,39	5013045,97	6170406,05	586950,96	5013045,65	6170406,09	586951,68	5013045,63	6170408,00
MP6	491848,20	5041272,38	6226639,74	491847,63	5041271,81	6226639,73	491848,91	5041272,68	6226641,11
PP1	695258,08	5025704,26	6086351,68	695258,05	5025704,40	6086352,16	695259,57	5025704,90	6086353,19
PP2	659974,84	5036093,99	6107205,74	659974,50	5036094,26	6107206,08	659975,34	5036093,61	6107207,56
PP3	598487,64	5054314,38	6143275,15	598487,54	5054314,71	6143275,33	598489,99	5054314,94	6143277,13
PP4	518475,90	5077875,20	6190575,50	518475,18	5077875,01	6190575,59	518475,74	5077875,67	6190577,01

продовження таблиці 2.3

Назва пунктів	Номера циклів вимірювань					
	20			29		
	X	Y	Z	X	Y	Z
R1G	856808,35	5376176,05	5801633,18	856807,94	5376177,04	5801632,74
R2G	376093,97	5332302,13	6168470,37	376093,91	5332301,54	6168469,58
АСР1	839319,20	4972213,30	6005675,03	839321,25	4972211,20	6005675,15
АСР2	381495,97	5107003,04	6279909,01	381495,43	5107002,68	6279909,74
MP1	729733,18	4970706,58	6086124,32	729731,55	4970706,23	6086124,36
MP2	682229,27	4984831,48	6114129,59	682229,34	4984831,37	6114129,48
MP3	634768,74	4998948,32	6142300,23	634768,42	4998948,32	6142300,10
MP4	586952,28	5013044,41	6170408,41	586952,61	5013044,75	6170408,59
MP6	491849,71	5041272,15	6226642,14	491849,32	5041271,98	6226642,21
PP1	695259,54	5025704,06	6086352,23	695260,17	5025704,97	6086352,80
PP2	659975,42	5036093,10	6107208,17	659975,17	5036093,70	6107208,25
PP3	598490,79	5054314,60	6143276,99	598491,05	5054315,15	6143276,86
PP4	518475,86	5077875,88	6190576,96	518475,63	5077876,64	6190576,97

Для наочності одержаних результатів, побудовані графіки зміни координат X , Y , Z відносно першого циклу спостережень для пунктів з мінімальною та максимальною динамікою зміною координат (рис. 2.3).

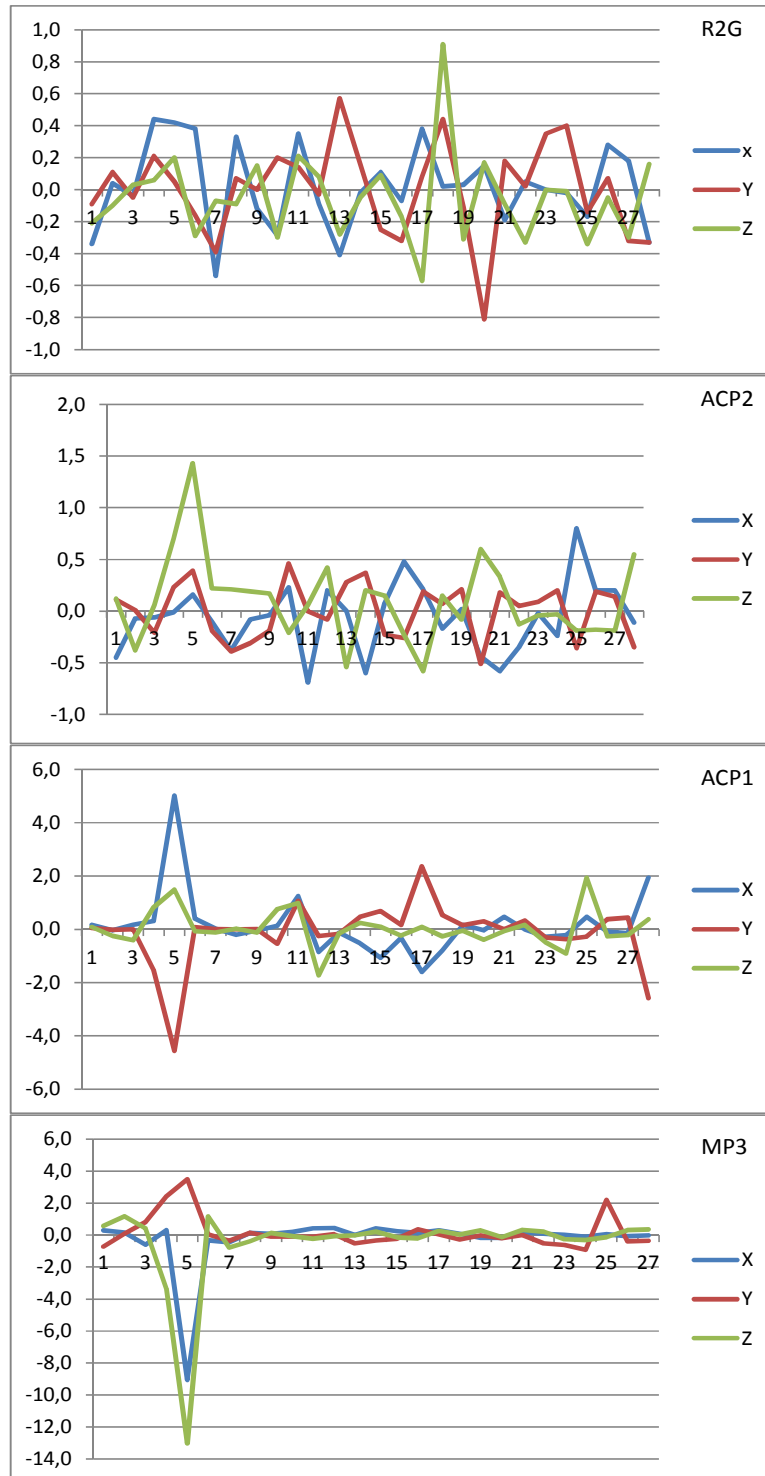


Рис.2.3 Графіки зміни координат X , Y , Z відносно першого циклу спостережень пунктів з мінімальною (R2G, ACP2) та максимальною (ACP1, MP3) зміною координат (мм)

А також графік загальних зміщень пунктів відносно першого циклу спостережень (рис. 2.4)

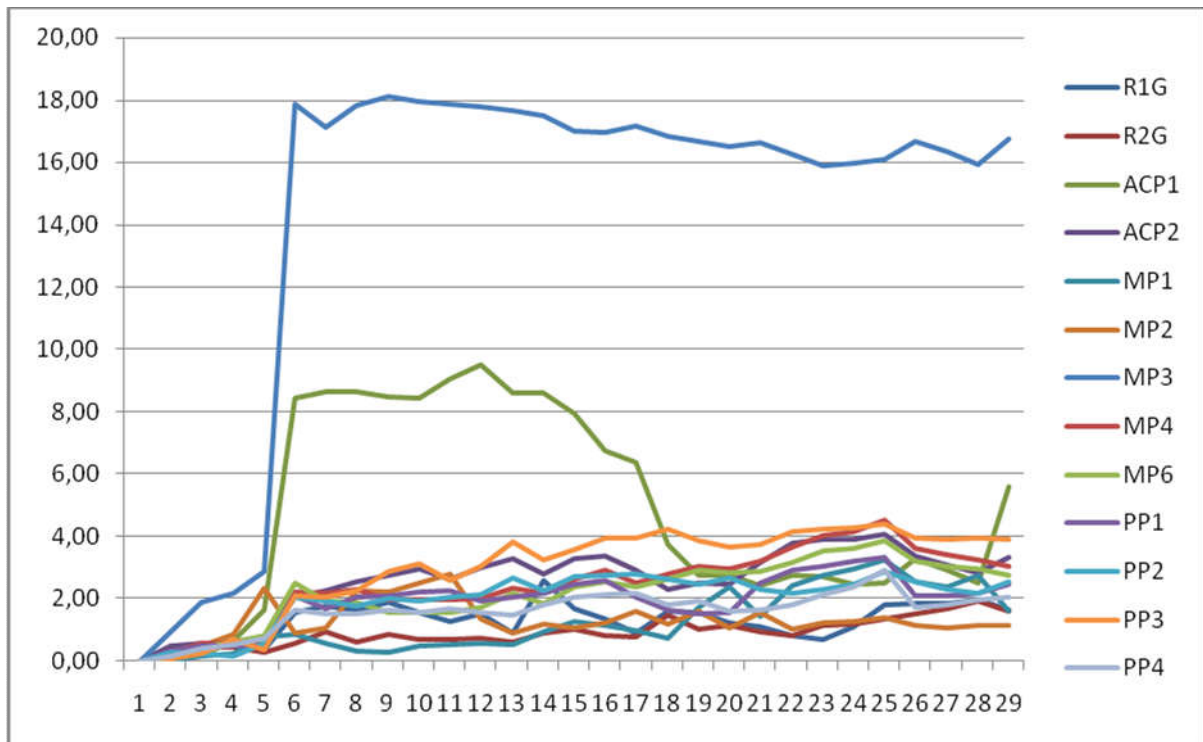


Рис.2.4 Графік зміни загальних зміщень пунктів відносно першого циклу спостережень (мм)

Оцінку точності результатів опрацювання спостережень проведемо наступним чином. Спочатку, за результатами зрівноваження кожного циклу за виразами (2.11) отримують СКП визначення координат відносно жорсткого пункту. Крім того, обчислюємо середню квадратичну кінематичну похибку визначення просторового положення за виразами (2.12). СКП положення координат пунктів із врахуванням похибок вимірів і похибок кінематики мережі розраховуємо за виразами (2.13). Загальна СКП положення кожного пункту обчислюється за виразами (2.14). Оцінка точності приведена в таблицях (2.4 – 2.6).

Таблиця 2.4

Середньо квадратична похибка положення пунктів, викликана похибками вимірів (мм)

Назва пунктів	Номера циклів вимірювань														
	1			5			10			20			29		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
R1G	0,21	0,18	0,86	0,47	0,72	1,11	0,25	0,21	0,11	0,32	0,22	0,20	0,52	0,69	0,37
R2G	0,18	0,16	0,73	0,40	0,62	0,98	0,22	0,18	0,10	0,27	0,19	0,17	0,44	0,59	0,32
АСР1	0,16	0,14	0,64	0,35	0,54	0,86	0,19	0,16	0,09	0,24	0,17	0,15	0,39	0,52	0,28
АСР2	0,15	0,13	0,63	0,35	0,53	0,84	0,19	0,15	0,08	0,24	0,17	0,15	0,38	0,51	0,27
MP1	0,13	0,11	0,54	0,30	0,46	0,73	0,16	0,13	0,07	0,20	0,14	0,13	0,33	0,44	0,23
MP2	0,12	0,11	0,51	0,28	0,43	0,68	0,15	0,12	0,07	0,19	0,13	0,12	0,31	0,41	0,22
MP3	0,12	0,11	0,50	0,28	0,42	0,67	0,15	0,12	0,07	0,19	0,13	0,12	0,30	0,40	0,22
MP4	0,12	0,11	0,50	0,27	0,42	0,67	0,15	0,12	0,07	0,19	0,13	0,12	0,30	0,40	0,22
MP6	0,13	0,11	0,51	0,28	0,43	0,69	0,15	0,12	0,07	0,19	0,13	0,12	0,31	0,41	0,22
PP1	0,13	0,11	0,51	0,28	0,43	0,69	0,15	0,13	0,07	0,19	0,13	0,12	0,31	0,42	0,22
PP2	0,12	0,11	0,50	0,28	0,42	0,67	0,15	0,12	0,07	0,19	0,13	0,12	0,30	0,41	0,22
PP3	0,12	0,11	0,50	0,27	0,42	0,67	0,15	0,12	0,07	0,19	0,13	0,12	0,30	0,40	0,21
PP4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Таблиця 2.5

Середньо квадратична похибка положення пунктів, викликана похибками кінематики мережі (мм)

Назва пунктів	Номера циклів вимірювань														
	1			5			10			20			29		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
R1G	0,00	0,00	0,00	0,40	0,85	0,85	3,16	1,92	2,26	3,40	2,24	2,63	3,51	2,64	2,80
R2G	0,00	0,00	0,00	0,44	0,48	0,48	2,64	1,02	1,70	2,78	1,33	1,96	2,85	1,69	2,10
ACP1	0,00	0,00	0,00	0,34	1,10	1,10	4,15	3,40	2,56	4,50	3,74	2,91	4,65	4,09	3,33
ACP2	0,00	0,00	0,00	0,32	0,71	0,71	1,88	1,60	2,16	2,12	1,81	2,33	2,29	2,07	2,47
MP1	0,00	0,00	0,00	0,47	0,49	0,49	2,28	0,77	1,65	2,58	1,14	1,82	2,86	2,05	2,10
MP2	0,00	0,00	0,00	0,67	0,62	0,62	2,67	1,23	1,96	3,11	1,43	2,25	3,18	1,88	2,35
MP3	0,00	0,00	0,00	0,44	1,70	1,70	7,01	2,90	7,03	7,06	3,00	7,06	7,08	3,42	7,11
MP4	0,00	0,00	0,00	0,36	0,55	0,55	2,68	0,93	2,44	2,85	1,41	2,55	2,97	1,73	2,65
MP6	0,00	0,00	0,00	0,48	0,88	0,88	3,31	1,94	4,24	3,56	2,22	4,42	3,69	2,63	4,56
PP1	0,00	0,00	0,00	0,31	0,59	0,59	1,92	1,29	2,33	2,09	1,74	2,47	2,28	2,20	2,61
PP2	0,00	0,00	0,00	0,39	0,64	0,64	2,88	1,50	2,93	3,06	1,70	3,05	3,11	2,12	3,16
PP3	0,00	0,00	0,00	0,45	0,85	0,85	3,19	1,91	2,26	3,42	2,21	2,42	3,53	2,61	2,54
PP4	0,00	0,00	0,00	0,35	0,50	0,50	2,46	1,02	2,14	2,63	1,17	2,32	2,71	1,37	2,45

Таблиця 2.6

Загальна середньо квадратична похибка положення пунктів (мм)

Назва пунктів	Номера циклів вимірювань														
	1			5			10			20			29		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
R1G	0,21	0,18	0,86	0,62	1,11	1,65	3,17	1,93	2,41	3,41	2,25	2,77	3,54	2,73	2,95
R2G	0,18	0,16	0,73	0,60	0,78	1,34	2,65	1,04	1,85	2,79	1,34	2,10	2,88	1,79	2,24
ACP1	0,16	0,14	0,64	0,49	1,23	1,43	4,16	3,40	2,64	4,51	3,75	2,99	4,66	4,13	3,40
ACP2	0,15	0,13	0,63	0,47	0,89	1,34	1,89	1,60	2,26	2,13	1,82	2,41	2,32	2,13	2,56
MP1	0,13	0,11	0,54	0,56	0,67	1,09	2,29	0,78	1,73	2,59	1,15	1,90	2,88	2,10	2,18
MP2	0,12	0,11	0,51	0,72	0,75	1,34	2,68	1,24	2,03	3,11	1,44	2,31	3,20	1,93	2,41
MP3	0,12	0,11	0,50	0,51	1,76	2,06	7,01	2,90	7,04	7,06	3,00	7,08	7,08	3,45	7,14
MP4	0,12	0,11	0,50	0,45	0,69	1,19	2,68	0,94	2,50	2,86	1,42	2,60	2,98	1,78	2,71
MP6	0,13	0,11	0,51	0,56	0,98	1,51	3,32	1,94	4,28	3,57	2,22	4,46	3,70	2,66	4,59
PP1	0,13	0,11	0,51	0,42	0,73	1,21	1,93	1,30	2,39	2,10	1,74	2,52	2,30	2,24	2,67
PP2	0,12	0,11	0,50	0,48	0,77	1,13	2,89	1,50	2,98	3,07	1,70	3,10	3,13	2,16	3,21
PP3	0,12	0,11	0,50	0,53	0,95	1,20	3,19	1,92	2,31	3,42	2,21	2,47	3,55	2,64	2,60
PP4	0,00	0,00	0,00	0,35	0,50	0,66	2,46	1,02	2,14	2,63	1,17	2,32	2,71	1,37	2,45

СКП положення пунктів, викликані похибками вимірів в циклах спостереження, мають незначні коливання в межах 0,1 – 1,0 мм (таблиця 2.4). СКП положення пунктів, викликані похибками кінематики мережі, є більшими від середньо квадратичних похибок вимірів і коливаються в межах 1 – 7 мм. Загальна СКП положення пунктів з збільшенням кількості циклів спостережень змінюється з меншою динамікою, ніж у перших циклах.

На рисунку 2.5 зображено графік зміни СКП просторового положення пунктів з врахуванням похибок вимірів і похибок кінематики мережі. З графіку видно, що після 5 – 6 циклів спостережень різке зростання точності визначення просторового положення пунктів практично припиняється.

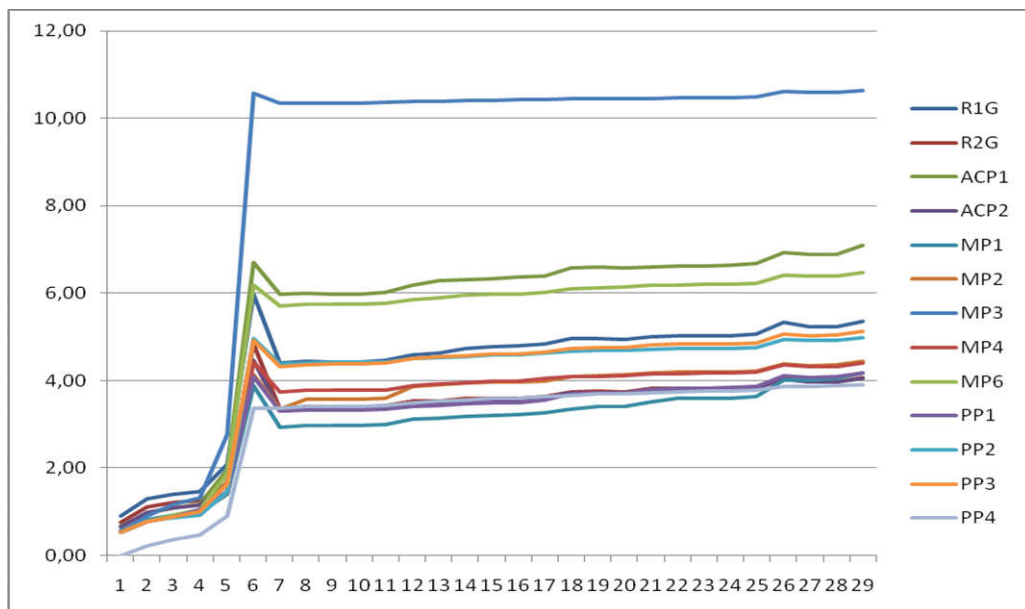


Рис.2.5 СКП просторового положення пунктів з врахуванням похибок вимірів і похибок кінематики мережі (мм).

2.3 Порівняння методики опрацювання кінематичних мереж для ГНСС – вимірів з класичною методикою

Результати, отримані за допомогою запропонованої нами методикою опрацювання ГНСС – вимірів на кінематичних геодезичних мережах, були порівняні з даними зрівноваження з використанням програмного забезпечення Bernese.

Ці дані, одержані в рамках проекту відновлення ГЕС, що проводиться спеціалістами компанії Leica Geosystems спільно з Укргідроенерго [80].

Опрацювання виконувалося відносно 11 перманентних ГНСС станцій мережі EPN (рис. 2.6).

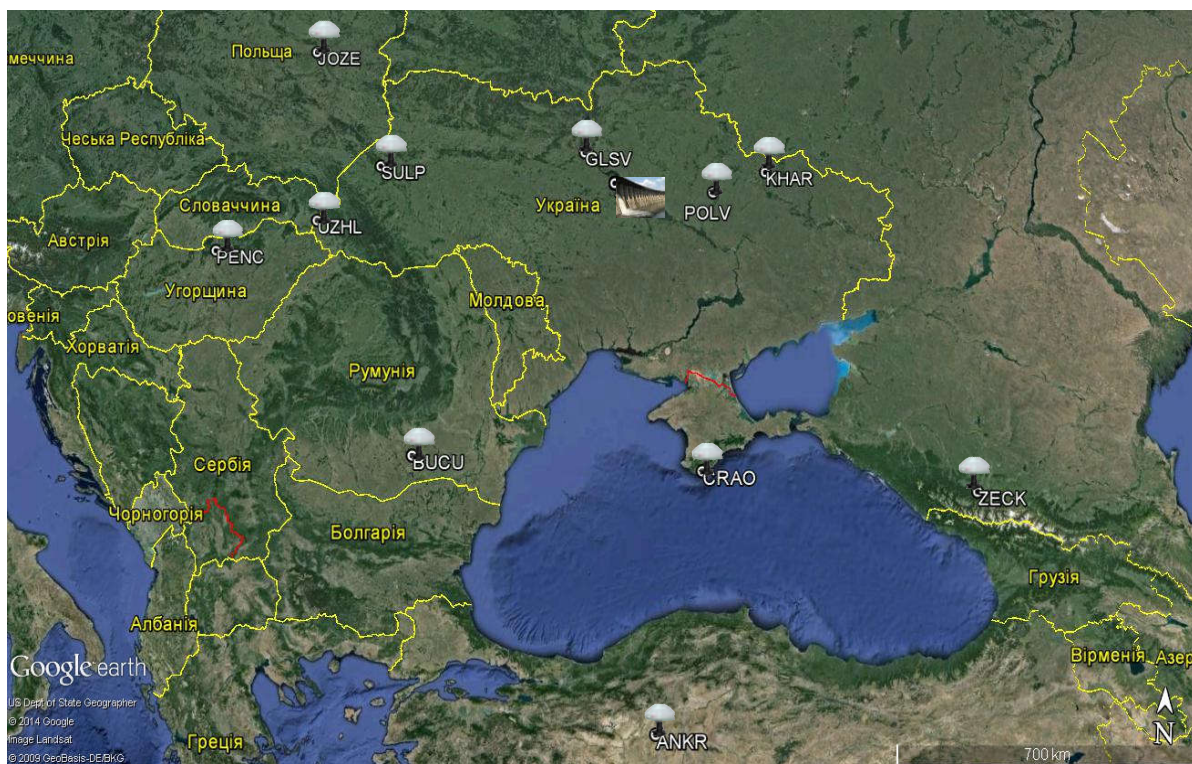


Рис. 2.6 Схема розташування перманентних ГНСС станцій

За вихідні нами було прийнято координати станцій та швидкості їх змін в системі ITRF2008 на епоху 01. 01. 2014, які були отримані на офіційному сайті ITRF [[www. itrf.ensg.ign.fr](http://www.itrf.ensg.ign.fr)].

В результаті опрацювання зберігаються файли остаточних координат, остаточних розв'язків, звіту з опрацювання даних.

В результаті опрацювання сесій добових ГНСС спостережень, було отримано координати пунктів системи автоматизованого геодезичного моніторингу Канівської ГЕС та середні квадратичні помилки їх визначення в системі координат ITRF2008.

За змінами координат відносно першого циклу спостережень побудовано графік зміни загальних зміщень кожного пункту, який приведено на рис. 2.7, та СКП просторового положення пунктів (рис. 2.8).

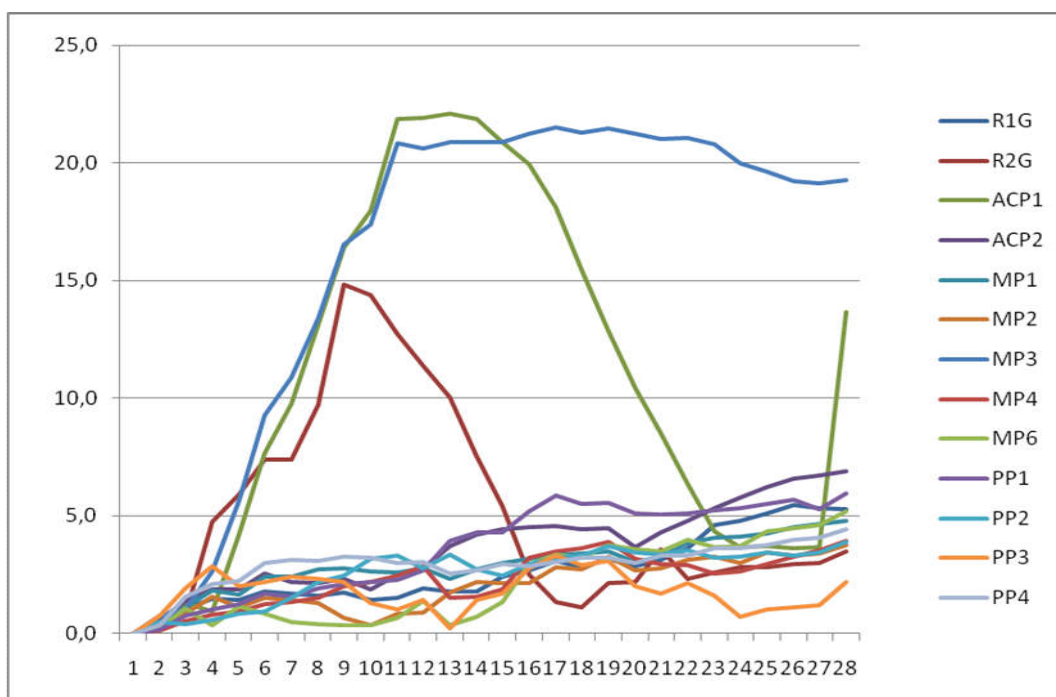


Рис.2.7 Графік зміни загальних зміщень пунктів відносно першого циклу спостережень за результатами зрівноваження в Bernese (мм)

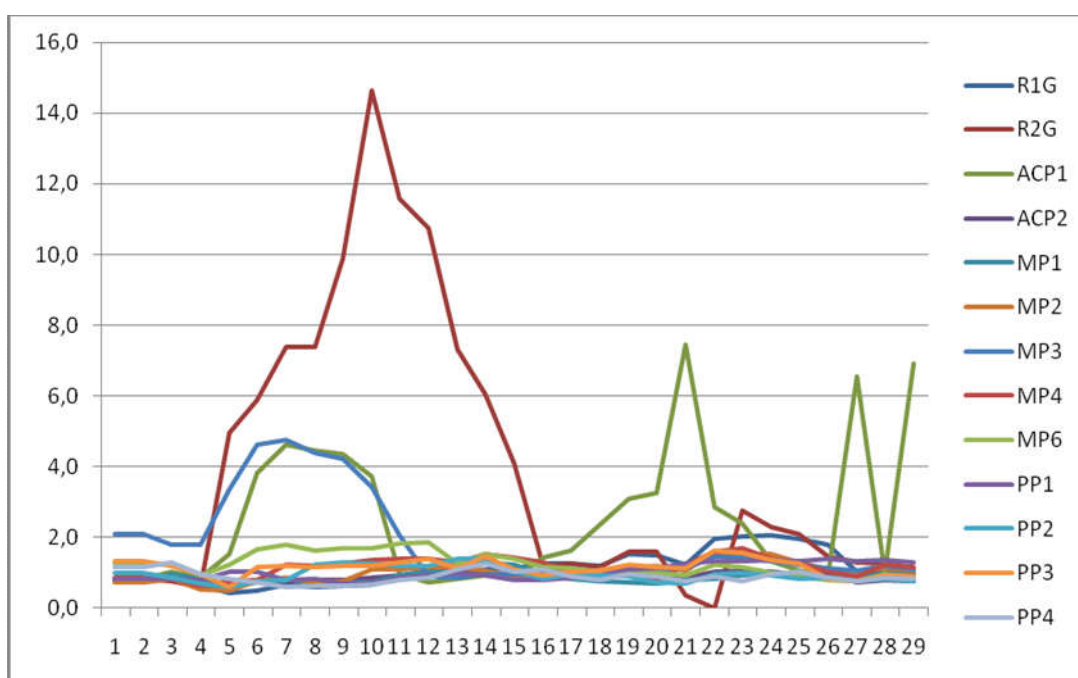


Рис.2.8 СКП просторового положення пунктів за результатами зрівноваження в ПЗ Bernese (мм).

Аналізуючи одержані результати можна зробити висновки, що обидва методи зрівноваження дають практично однакові результати (за винятком пункту R2G) (рис. 2.4 та 2.7). А це значить, що запропоновану методику

опрацювання кінематичних мереж для ГНСС – вимірів можна застосовувати для зрівноваження локальних ГНСС – мереж замість програмного забезпечення Bernese. Важливою перевагою використання даної методики є те, що зрівноваження проводиться без прив'язки до перманентних базових станцій. Це дозволяє нам встановити необхідну початкову систему відліку, для виокремлення впливу геодинамічних явищ на регіональному та локальному рівнях. Крім того, в процесі зрівноваження мережі є можливість одержання інформації про кінематичні характеристики пунктів, а значить і про їх стійкість.

Методика проведення оцінки точності результатів зрівноваження в нашому методі дає інформацію не тільки про СКП вимірів, але й про похибки моделювання кінематики пунктів.

2.4 Методика районування територій за результатами опрацювання кінематичних мереж

Аналіз та прогнозування деформаційних процесів на геодинамічних полігонах має важливе значення для безпечної експлуатації великих промислових об'єктів [115, 158]. Достовірний контроль деформаційних процесів та встановлення причини їх появи можливий при застосуванні теоретично обґрунтованої з позицій кінематики, методики опрацювання кінематичних геодезичних мереж [75, 102]. Метод геометричного нівелювання дає інформацію про стан опорної мережі на момент вимірів, тобто, з певною періодичністю. Положення реперів між циклами спостережень з результатів вимірів нам невідомо. Тому, необхідно проводити аналіз стану глибинних реперів, який дасть можливість прогнозувати деформаційні процеси на об'єктах спостережень.

Для проведення аналізу стану глибинних реперів необхідно оцінити їхню кінематику, що дозволить проведення районування території промислового об'єкту за спільними кінематичними характеристиками (швидкостей зміщень, період та розмах коливань реперів). Модель вертикальних лінійних зміщень і періодичних коливань глибинного репера можна описати виразом [101]:

$$h = a \cdot t + b + c \cdot \cos\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{T} n\right) + s \cdot \sin\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{T} n\right), \quad (2.15)$$

де a, b – коефіцієнти рівняння регресії лінійного зміщення глибинного репера (a – середня річна швидкість зміщення репера, b – початкова висота репера); c, s – гармонічні коефіцієнти, t_0, t – початкова та поточна епоха спостережень, n – кількість періодів коливань тривалістю T , яка вміщується у проміжок $t-t_0$.

У виразі (2.15) $a \cdot t + b$ – рівняння прямої, яке фактично описує напрямок, у якому відбувається зміщення глибинного репера, а друга частина формули описує періодичність зміни положення репера.

За результатами вимірів, для кожного репера способом найменших квадратів знаходять коефіцієнти a і b рівняння регресії (2.15). Коефіцієнт a характеризує лінійний тренд, тому для вивчення періодичності коливань застосуємо вираз:

$$h = c \cdot \cos\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{T} n\right) + s \cdot \sin\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{T} n\right) \quad (2.16)$$

Оскільки гармонічні коливання залежать від довжини періоду, то необхідно для кожного репера визначити довжину періоду коливань, який найкраще описує ці вертикальні зміщення.

З цією метою нами у середовищі MATHCAD складено програму для підбору оптимальної гармонічної кривої для опису кінематики глибинних реперів. Для кожного глибинного репера складають систему рівнянь (2.16) з розв'язку яких, одержують оптимальний період коливань. Кожне рівняння відповідає циклу спостережень. Критерієм вибору оптимальної гармонічної функції опису зміщень реперів є мінімум виразу:

$$M(T) = c \cdot \cos\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{T} n\right) + s \cdot \sin\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{T} n\right) - H_i = \min, \quad (2.17)$$

де H_i – висота репера у відповідному циклі спостережень.

Для визначення оптимального періоду коливань кожного глибинного репера досліджують зміну СКП апроксимації першими членами розкладу

рядом Фур'є висотних коливань реперів від довжини періоду (2.17). Для кожного репера визначено оптимальний період коливань, який відповідає мінімальному значенню СКП апроксимації рядом Фур'є кривої висотних коливань глибинного репера. За результатами оптимального розв'язку системи рівнянь (2.17) одержують коефіцієнти гармонічних коливань c та s та розмах коливань кожного репера.

2.5 Реалізація методики районування території за результатами опрацювання кінематичних мереж на прикладі опорної висотної мережі на території Рівненської АЕС

Опорна висотна мережа Рівненської АЕС (рис. 2.9) складається з дев'яти глибинних реперів (Rp3 – Rp11), розміщених на території енергоблоків № 1 - 4 та двох глибинних реперів (Rp1, Rp2), розміщених на території градирень. Глибина закладання реперів від 31 до 43 м, причому усі репери закладені не менше 0,5 м в корінні базальтові породи. Період закладання реперів з березня 1980 р. по жовтень 2000р.

За період з 1984 по 2013 роки було проведено 110 циклів спостережень. Висоти реперів визначені нівелюванням I - го класу. Середні квадратичні похибки на один кілометр ходу нівелювання по нев'язках в полігонах і по результатах зрівнювання за весь період спостережень знаходяться в межах: $\mu_{км}=0,29$ мм і $\mu_{км}=0,24$ мм [147].

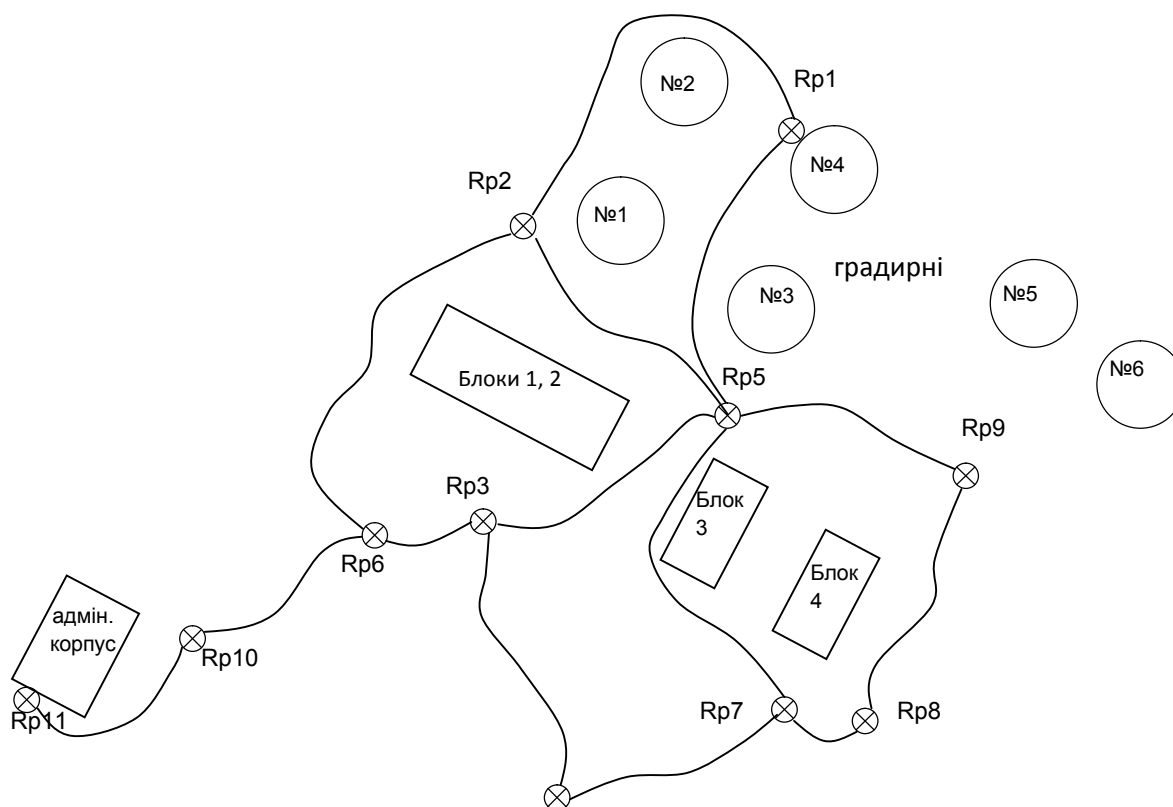


Рис. 2.9 Схема опорної висотної мережі на території Рівненської АЕС

Вихідними даними для розрахунку стійкості висотної основи служили висоти глибинних реперів одержані з результатів вимірів виконаних за період з 03. 1984 по 11. 2013р [31] (Додаток А). Репер № 5 прийнято за нерухомий. За даними вимірів побудовано графіки зміни висот глибинних реперів протягом періоду спостережень (рис. 2.10). На рисунку 2.10 червона лінія показує зміну висотного положення глибинних реперів.

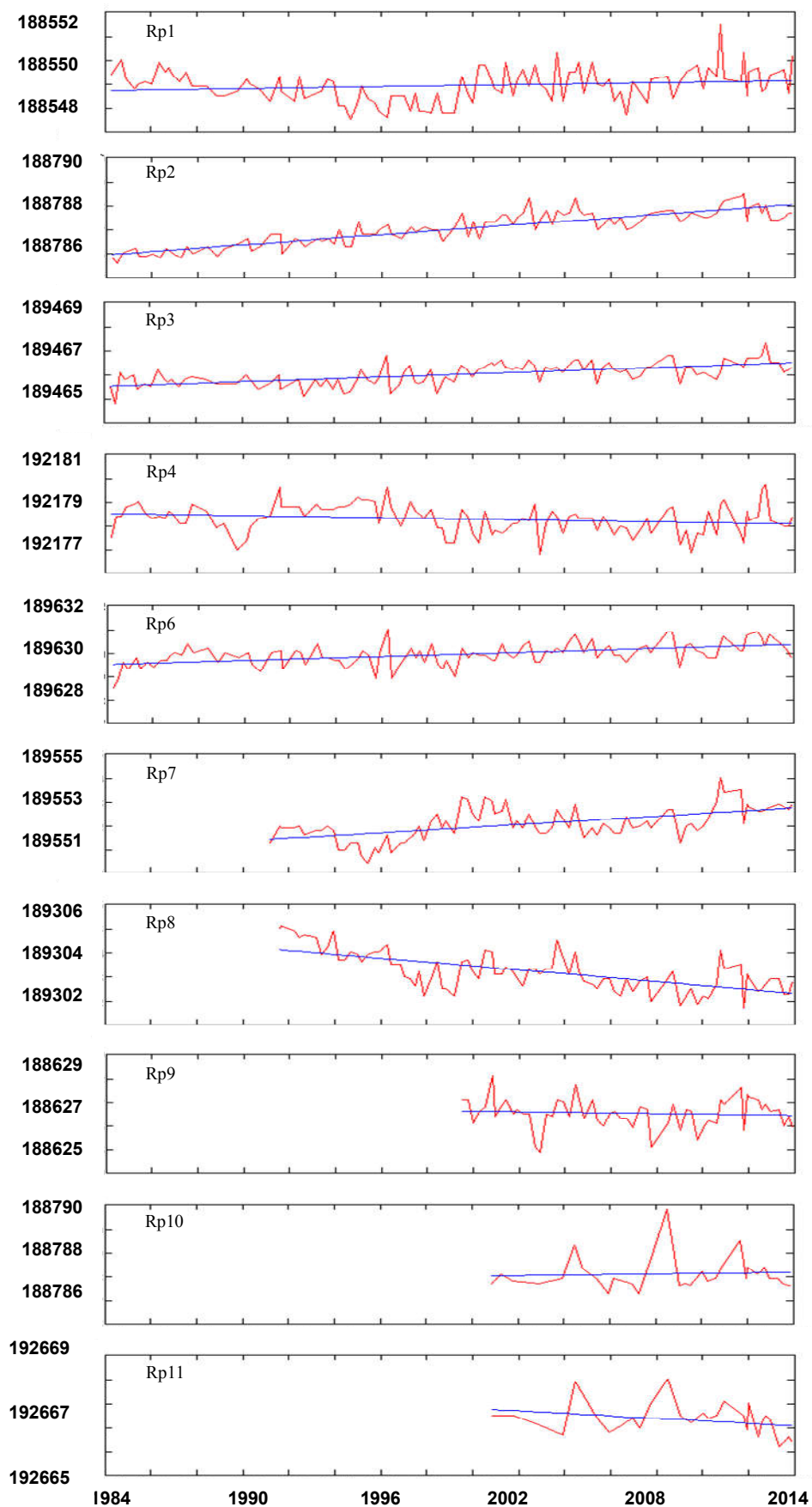


Рис. 2.10 Графік зміни висотного положення глибоких реперів (в мм)

Використовуючи вираз (2.15) для усіх реперів були обчислені коефіцієнти a і b . Оскільки коефіцієнт b відноситься до початкової висоти репера, нас цікавить виключно коефіцієнт a , що є середньою річною швидкістю зміщення репера v . В таблиці 2.7 представлено значення середніх річних швидкостей зміщення реперів і СКП їх визначення.

Таблиця 2.7

Середні річні швидкості зміщень реперів та похибки їх визначення

№ репера	v , мм/рік	m_v , мм/рік
1	0,014	0,008
2	0,070	0,004
3	0,033	0,004
4	-0,015	0,006
5	0,000	0,000
6	0,028	0,004
7	0,058	0,009
8	-0,080	0,010
9	-0,012	0,019
10	0,012	0,032
11	-0,052	0,029

За даними таблиці 2.7 побудовано графік зміни висотного положення реперів (синя лінія на рис. 2.10). За результатами обчислення швидкостей зміщень реперів побудована картосхема розподілу річних вертикальних швидкостей руху земної кори на території Рівненської АЕС (рис. 2.11).

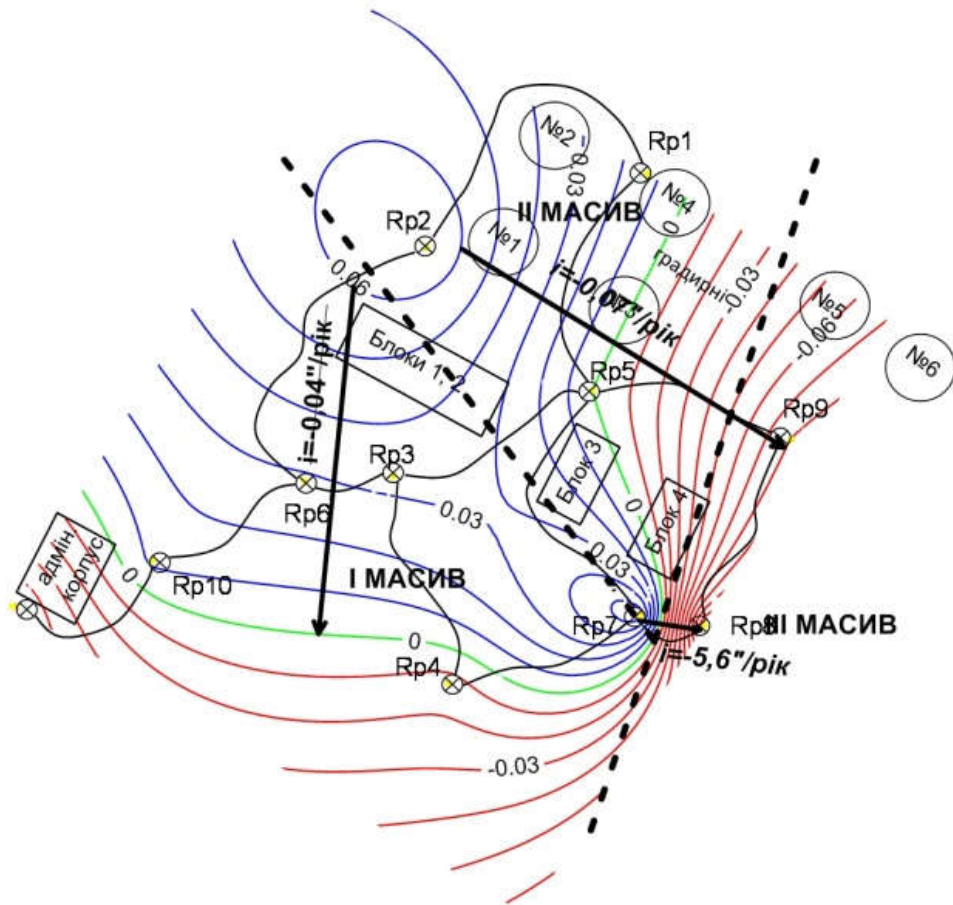


Рис. 2.11 Картохема розподілу річних вертикальних швидкостей руху земної кори та річні швидкості нахилу земної поверхні на території Рівненської АЕС. (ізолінії проведені з інтервалом 0,01 мм/рік)

— — — — — - *границі масивів*; \rightarrow - *напрямок та величина швидкості нахилу земної поверхні*;
 ————— - *ізолінії підняття поверхні*;
 ————— - *ізолінії осідання поверхні*.

У зміщеннях позбавлених лінійного тренду залишилась присутньою тільки періодична компонента зміщень глибинних реперів (рис. 2.12, червона лінія). На графіках приведених на рис. 2.12 видно, що величини зміщень реперів мають періодичну закономірність.

З метою визначення оптимального періоду коливань кожного глибинного репера досліджено зміну СКП апроксимації рядом Фур'є висотних коливань реперів від довжини періоду (2.17).

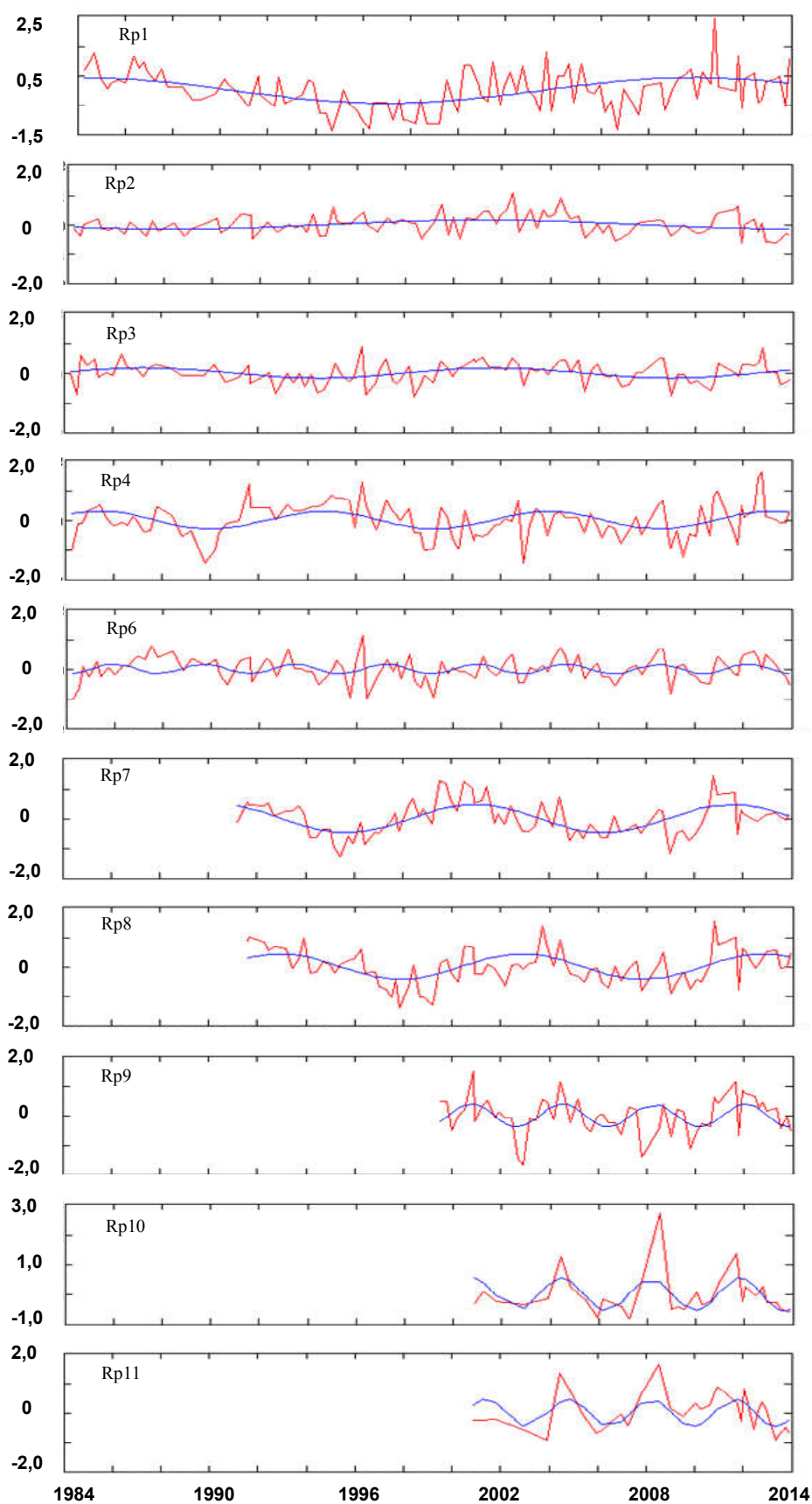


Рис.2.12 Графік вертикальних зміщень глибинних реперів позбавлених лінійного тренду (мм)

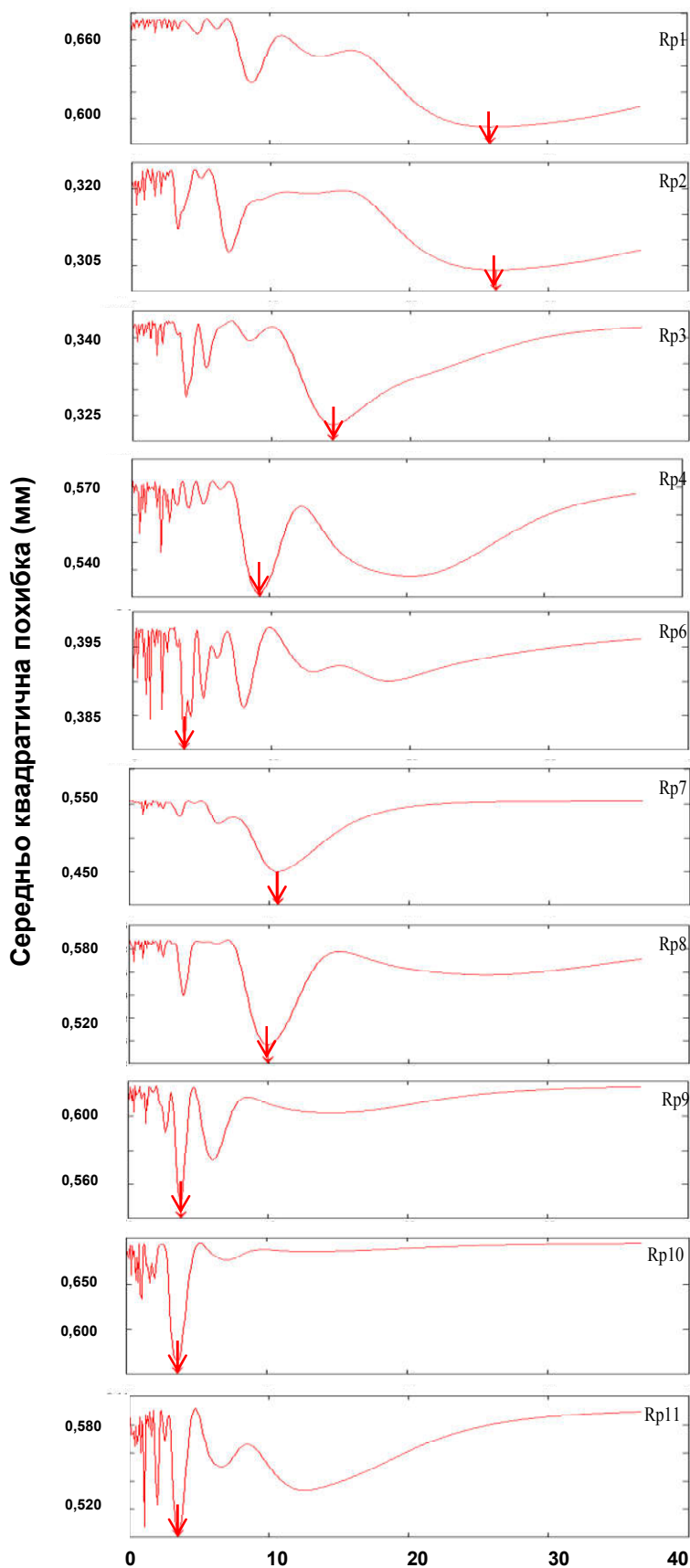


Рис.2.13 Графік визначення оптимального періоду коливань глибинних реперів
(в роках)

Для кожної кривої визначено оптимальний період коливань (на рис. 2.12, лінія синього кольору), який відповідає мінімальному значенню середньоквадратичної похибки (на рис. 2.13 позначено стрілкою). На рис. 2.13 представлено зміну середньо квадратичної похибки апроксимації рядом Фур'є кривої висотних коливань кожного глибинного репера, позбавлених лінійного тренду, в залежності від величини періоду гармонічної функції.

За результатами визначення оптимального періоду коливань з розв'язку системи рівнянь (2.16) визначено гармонічні коефіцієнти c та s . В таблиці 2.8 представлено оптимальні періоди коливань, розмах коливань та коефіцієнти (c , s) для кожного глибинного репера.

Таблиця 2.8

**Оптимальний період і розмах коливань глибинних реперів та
коефіцієнти гармонічних коливань**

№ репера	T, роки	Розмах коливань репера ,мм	c	s
1	26,5	0,9	0,4341	0,0032
2	26	0,3	-0,0821	-0,1275
3	14	0,3	0,0226	0,1642
4	9	0,6	0,1680	0,2366
6	4	0,3	-0,1583	-0,0185
7	11	0,9	0,4254	-0,1677
8	10	0,9	0,1463	0,4026
9	4	0,8	-0,3852	0,0715
10	3,5	1,1	0,1195	0,5301
11	3,5	0,9	-0,3650	0,2680

На основі одержаних кінематичних характеристик мережі можна стверджувати, що репера № 1 та № 2 мають період коливання 26 років, що відповідає практично тривалості спостережень. Довгоперіодична складова свідчить про їх стійкість. Але для репера № 1 відхил від гармонічної кривої та розмах коливань є значно більшими ніж для репера № 2 (рис. 2.12). Для реперів

№№ 3, 4, 7, 8 період коливань знаходиться в межах від 9 до 14 років. Ця група реперів зазнає середньо періодичних коливань, причому, мінімальний розмах коливань має репер № 3 (рис. 2.12). Репери №№ 6, 9, 10, 11 зазнають коротко періодичних коливань тривалістю 3,5 – 4 роки. Причому, репери №№ 9, 10, 11 мають великий розмах коливань від 0,7 до 1,0 мм, а репер № 6 всього лиш 0,3 мм, що свідчить про стійкість висотного положення цього репера.

На основі складених ізоліній річних вертикальних швидкостей руху земної кори (рис. 2.11), територію Рівненської АЕС можна умовно розділити на три масиви. На території масиву I розташовані енергоблоки №1 - 2. На території масиву II розташовані енергоблок № 3 та градирні № 1 - 4. На території масиву III розташований енергоблок № 4.

I масив (на якому розташовані репери 3, 4, 6, 10, 11) характеризується сталою швидкістю нахилу в південному напрямку території величиною 0,04" на рік та періодом коливань 5 – 8 років.

II масив (на якому розташовані репери 1, 2, 5) характеризується швидкістю нахилу в південно-східному напрямку величиною 0,07" на рік та періодом коливань 15 – 25 років.

III масив (на якому розташовані репери 7, 8, 9) зазнає нахилу в східному напрямку з аномальною швидкістю 5,6" на рік та періодом коливань 4 – 10 років.

Висновки до розділу 2

1. Розроблено методику опрацювання ГНСС – вимірів на кінематичних геодезичних мережах з врахуванням коефіцієнтів кінематики геодезичних пунктів та апробовано її на опорній мережі системи автоматизованого геодезичного моніторингу інженерних споруд Канівської ГЕС.
2. Порівняння цих результатів та даних зрівноваження з використанням програмного забезпечення Bernese, доводить можливість використання цієї методики без прив'язки до перманентних станцій мережі ITRF, що

дозволяє ефективно вирішувати задачі з врахування впливу геодинамічних явищ локального характеру на досліджувану територію.

3. Запропоновано методику районування території техногенних геодинамічних полігонів за даними повторних висотних вимірів, з застосуванням математичного апарату.
4. На прикладі опорної висотної мережі Рівненської АЕС досліджена кінематика реперів висотної основи, та на основі цього, проведено групування реперів за спільними кінематичними характеристиками та районування території об'єкту на три блоки. Блок №1 характеризується швидкістю нахилу території 0,04" на рік в південному напрямку та періодом коливань 5 – 8 років, блок № 2 характеризується швидкістю нахилу території 0,07" на рік в південно-східному напрямку та періодом коливань 15 – 25 років і блок №3 характеризується швидкістю нахилу території 5,6" на рік в східному напрямку та періодом коливань 4 – 10 років.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ СУМІСНОГО ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ГЕОМЕТРИЧНОГО НІВЕЛЮВАННЯ ТА НАХИЛОМІРНИХ ВИМІРІВ

Комплексні автоматизовані системи деформаційного моніторингу включають в себе сучасне геодезичне обладнання (супутникові приймачі, електронні тахеометри, цифрові нівеліри, системи гідростатичного та гідродинамічного нівелювання), різні види датчиків просторових переміщень, нахилу, температури, тензометри і т. п. (сенсори), які працюють автономно, тобто без участі виконавця або оператора. Вони призначені для збору параметрів, які передаються в центр моніторингу для опрацювання і аналізу. Для одержання правдивих результатів спостережень одержаних від усіх елементів автоматизованої системи необхідно опрацьовувати їх сумісно.

Питання сумісного опрацювання результатів геодезичних вимірів, добре вивчені та розроблені при побудові геодезичних мереж з застосуванням ГНСС – спостережень та класичних наземних методів визначення координат. Вони розглянуті в роботах [9, 66, 81, 91], де розроблені алгоритми обчислення і зрівноваження складних і різноманітних локальних мереж, що містять як наземні геодезичні, так і супутникові навігаційні вимірювання.

Сумісне опрацювання результатів високоточного геометричного нівелювання та нахиломірних вимірів з використанням цифрових інклінометрів розглянуто недостатньо. Результати вимірів інклінометрами використовуються або самостійно, або, як додаткова інформація до вимірів «традиційними» технологіями. Основною проблемою, яку необхідно вирішити при сумісному опрацювання результатів геометричного нівелювання та нахиломірних вимірів є приведення до «спільного знаменника» різнотипних даних спостережень (виміряних перевищень чи висот та кутів нахилу).

3.1. Теоретичне обґрунтування методики сумісного опрацювання.

Необхідно зазначити, що поєднання методів геометричного нівелювання та нахиломірних спостережень можливе лише тоді, коли досліджувана територія є монолітно – суцільна. Це може бути фундамент технологічного обладнання інженерної споруди, або земна поверхня в межах суцільної тектонічної плити [80]. Оскільки цифровий інклінометр вимірює кути нахилу, а не перевищення як нівелір, перед початком розробки методики сумісного зрівноваження необхідно знайти залежності між перевищеннями та кутами нахилу. В загальному випадку для визначення перевищення застосовується вираз

$$h = S \cdot \operatorname{tgi}, \quad (3.1)$$

де S - віддаль між точками для яких обчислюється перевищення, i - величина кута нахилу.

Цифровий інклінометр вимірює кути нахилу в двох взаємно перпендикулярних площинах i_x та i_y , тому вираз (3.1) застосовувати для визначення перевищень інклінометром не можна.

Розглянемо методику обчислення зміни перевищення за результатами вимірів цифровим інклінометром. Нехай в точці 1 (рис 3.1) встановлено цифровий інклінометр, який зафіксував кути нахилу по осям X та Y відповідно i_x та i_y . Для того, щоб обчислити величину змін перевищення по напрямку максимального нахилу необхідно знайти максимальне значення кута нахилу i :

$$i = \sqrt{i_x^2 + i_y^2}. \quad (3.2)$$

Поскільки величина максимального значення кута нахилу одержана в радіанах, то у виразі (3.1) нею можна замінити тангенс кута нахилу. Якщо нас цікавить перевищення будь, якої точки A , яка знаходиться в межах жорсткої основи необхідно визначити величину нахилу на цю точку та місце її розташування відносно цифрового інклінометра.

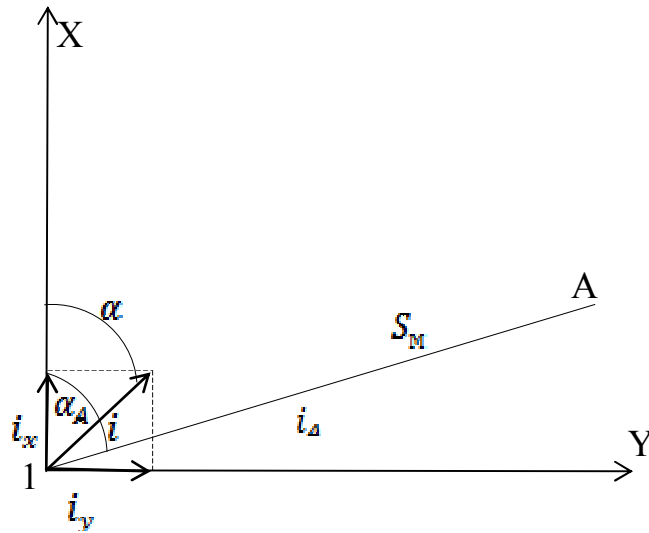


Рис. 3.1 Визначення залежності між перевищеннями та кутами нахилу

Для цього, необхідно знайти напрямок максимального кута нахилу α відносно однієї з осей (для зручності це вісь X):

$$\alpha = \arctan\left(\frac{i_x}{i_y}\right), \quad (3.3)$$

а також, напрямок α_A на точку A від осі X. Цю величину знаходимо за значеннями координат взаємного розташування цифрового інклінометра та точки A:

$$\alpha_A = \arctan\left(\frac{Y_A - Y_1}{X_A - X_1}\right), \quad (3.4)$$

де X_1, Y_1, X_A, Y_A – відповідні координати цифрового інклінометра та точки A.

Після чого, знаходимо величину кута нахилу i_A на точку A,

$$i_A = i \cdot \cos(\alpha_A - \alpha), \quad (3.5)$$

а також перевищення $h_{мм}$ до цієї точки в міліметрах

$$h_{мм} = i_A \cdot S_M, \quad (3.6)$$

де S_M – відстань від точки встановлення інклінометра до точки A, в м, яку знаходимо за виразом:

$$S = \sqrt{(X_A - X_1)^2 + (Y_A - Y_1)^2}. \quad (3.7)$$

Знаходження перевищень за виразами (3.2 – 3.7) є правильними у випадку коли інклінометр встановлений в точці 1 не змінює свого положення (не нахиляється). У випадку, коли інклінометр зазнає зміщень (нахилу) разом з будь якою точкою А, необхідно знайти величини нахилу самого інклінометра δ_x та δ_y (рис. 3.2) відносно нерухомої точки 1, які будуть мати обернений знак до величин кутів нахилу виміряних інклінометром:

$$\delta_X = -i_X, \delta_Y = -i_Y. \quad (3.8)$$

В такому випадку, поправка за нахил інклінометра $\delta_{hX_{інкл}}$, $\delta_{hY_{інкл}}$ а також поправки за зміну перевищення точки А δ_{hX_A} , δ_{hY_A} за рахунок нахилу інклінометра по осі X та Y знаходимо за виразами:

$$\begin{aligned} \delta_{hX_{інкл}} &= \delta_x \cdot \Delta X_i, \delta_{hY_{інкл}} = \delta_y \cdot \Delta Y_i; \\ \delta_{hX_A} &= \delta_x \cdot \Delta X_A, \delta_{hY_A} = \delta_y \cdot \Delta Y_A, \end{aligned} \quad (3.9)$$

де ΔX_i , ΔY_i та ΔX_A , ΔY_A відповідні проекції відстаней від інклінометра до нерухомої точки 1 та до точки А на осі X та Y.

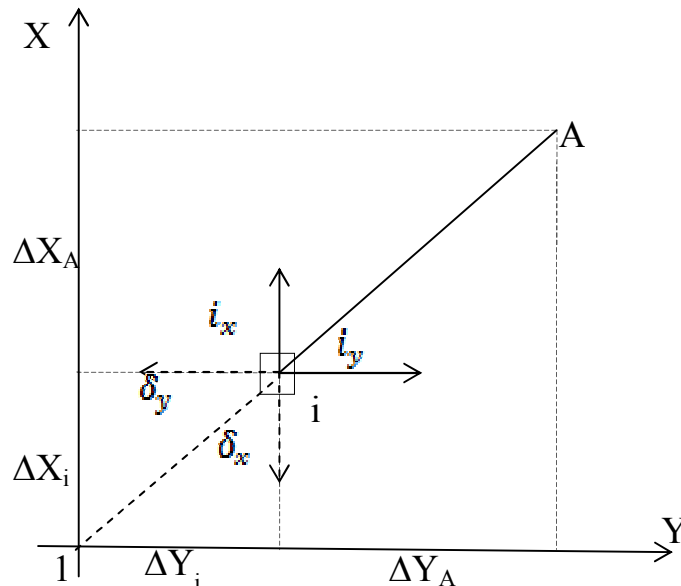


Рис. 3.2 Визначення перевищення з врахуванням величини нахилу самого інклінометра

Тоді, перевищення точки А з врахуванням величини нахилу самого інклінометра $h_{заг}$ знайдемо за виразом:

$$h_{\text{заг}} = h_{\text{мм}} + \sqrt{\delta^2_{hXA} + \delta^2_{hYA}}. \quad (3.10)$$

Сумісне зрівноваження результатів геометричного нівелювання та нахиломірних вимірів буде виконано параметричним методом.

В рівняннях поправок у мережі нівелювання невідомими величинами (параметрами) є висоти невідомих точок. Точніше, не самі висоти, а поправки до наближених значень висот цих точок будуть однаковими як для геометричного нівелювання, так і для нахиломірних вимірів. В загальному вигляді рівняння поправок виміряного перевищення має вигляд

$$v_{ij} = dH_j - dH_i + (h_{ij}^0 - h_{ij}), \quad (3.11)$$

де v_{ij} – поправка у виміряне перевищення, dH_j , dH_i – поправки в наближені значення висоти точок j та i відповідно, h_{ij}^0 – різниця перевищень, обчислених за наближеними висотами точок та h_{ij} – виміряне перевищення.

В рівняннях поправок для нахиломірних вимірів у виразі (3.11) виміряне перевищення буде обчислюватися за виразом (3.10).

В матричному вигляді поправки до наближених значень невідомих висот точок x знайдемо за виразом

$$x = -\left(A^T P A\right)^{-1} \left(A^T P L\right), \quad (3.12)$$

де A - матриця коефіцієнтів при поправках до висот невідомих точок, P – вагова матриця, L – вектор вільних членів.

Зміна перевищення визначена за результатами геометричного нівелювання та нахиломірних вимірів будуть мати різні похибки, тому необхідно обчисити вагові коефіцієнти за виразами 3,13 та 3,14:

$$P = \frac{c}{m_h^2}, \quad (3.13)$$

де m_h – СКП виміру перевищення нівеліром.

$$m_h = m_i \cdot S, \quad (3.14)$$

де m_i – СКП виміру кута нахилу інклінометром, S – відстань від інклінометра до точки в метрах.

Вектор вільних членів L представляє собою різницю наближених висот точок та висот з відповідних циклів спостережень.

Оцінку точності результатів опрацювання спостережень виконується за виразом:

$$m_H = \mu \sqrt{Q_{Hii}}, \quad (3.15)$$

де Q_{Hii} – відповідні діагональний елемент матриці оберненої до матриці нормальних рівнянь; μ – середня квадратична похибка одиниці ваги, яка знайдена за виразом

$$\mu = \sqrt{\frac{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}}{r}}, \quad (3.16)$$

де r – кількість надлишкових вимірів.

3.2 Перевірки методики сумісного опрацювання

З метою перевірки методу сумісного опрацювання результатів високоточного геометричного нівелювання, та нахиломірних вимірів інклінометрами, та для дослідження точності визначення зміни висот одержаних цими методами, був проведений експеримент, який полягав у порівнянні зміни перевищень визначених методом високоточного геометричного нівелювання, та вимірів інклінометрами.

Для проведення експерименту була змонтована металева рама січенням (4 x 4 см) у вигляді прямокутника розміром 5,92 x 6,00 м. Рама була встановлена на чотири кронштейни, які були закріплені у стінах та колонах приміщення (рис 3.3). Два кронштейни були закріплені в стіні жорстко, а інші два мали мікрометричні гвинти для зміщення (піднімання чи опускання) усієї конструкції в межах 3 см (рис. 3.3, 3.4). Величину зміщення задавали за допомогою індикатора годинникового типу ($m_{\text{г}} = 0.01\text{мм}$) (рис 3.5)



Рис. 3.3 Розташування рами в приміщенні



а



б

Рис. 3.4 Кронштейни закріплені в стіні
а – жорстко, б – з мікрометричним гвинтом



Рис. 3.5 Кронштейн з мікрометричним гвинтом

На двох протилежних сторонах рами були встановлені інклінометри (рис 3.6), так щоб вісь нахилу X була паралельна стороні рами. Інклінометр через комунікаційний «COM» порт та за допомогою кабелю був під'єднаний до комп'ютера, а також до джерела живлення 12 В (рис 3.6).



Рис. 3.6 Інклінометр встановлений на рамі та під'єднаний до комп'ютера.

Для передачі даних та їх опрацювання використовувалося програмне забезпечення «NIVEL 210 Data Reader», яке дозволяє не тільки переглядати, записувати та відображати результати у реальному часі, але й опрацьовувати їх та представляти у зручному для спостерігача вигляді. При запуску програми з'являлося комунікаційне вікно (рис 3.7).

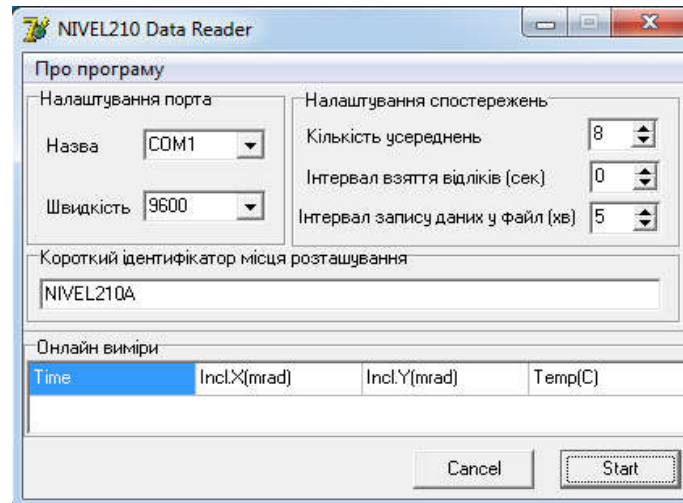


Рис. 3.7 Комунікаційне вікно програми «NIVEL 210 Data Reader»

За допомогою підменю «Налаштування порта» вибиралася назва порту під'єднання до комп'ютера (COM1 – COM225), а також встановлювалася швидкість передачі даних (1200, 2400, 9600, 19200, 38400). За допомогою підменю «Налаштування спостережень» встановлювалося кількість усереднень результатів вимірювань, інтервал взяття відліків та інтервал запису даних на комп'ютер. Крім того, за допомогою підменю «Короткий ідентифікатор місця розташування» вносилися потрібну текстову інформацію яка відображалася у назві файлу вимірів. Після проведення усіх налаштувань, натиснувши клавішу «Start» у вікні «Он-лайн виміри» починали з'являтися з встановленим інтервалом відліки результатів вимірів часу, величини нахилу інклінометра в площині X та Y, а також температура. Ці дані з встановленим інтервалом записувалися в окремий файл на комп'ютер, причому добові файли спостережень утворювали окремий файл.

Для проведення нівелювання на кутах рами закріплені рейки довжиною 0,7 м з наклеєними сканами кодових рейок (рис 3.8), та використані чотири цифрові нівеліри Trimble DiNi 03 (рис 3.3). Скан представляє собою скановане та роздруковане на плотарі зображення кодової рейки Trimble довжиною 50 см. Перед початком експерименту були проведені дослідження СКП визначення перевищень з використанням сканів рейки. Результати досліджень довели можливість використання сканованих зображень для визначення висот при

віддалі від нівеліра до рейки в межах 2,0 – 10,0 м. Завдяки синхронізації годинників комп'ютерів та цифрових нівелірів дані нівелювання та нахиломірних вимірів нами одержувалися в один момент часу у весь період проведення експерименту.



Рис. 3.8 Скан кодової рейки закріпленої на куті рами

В загальному вигляді конструкція для проведення експерименту приведена на рис 3.9.

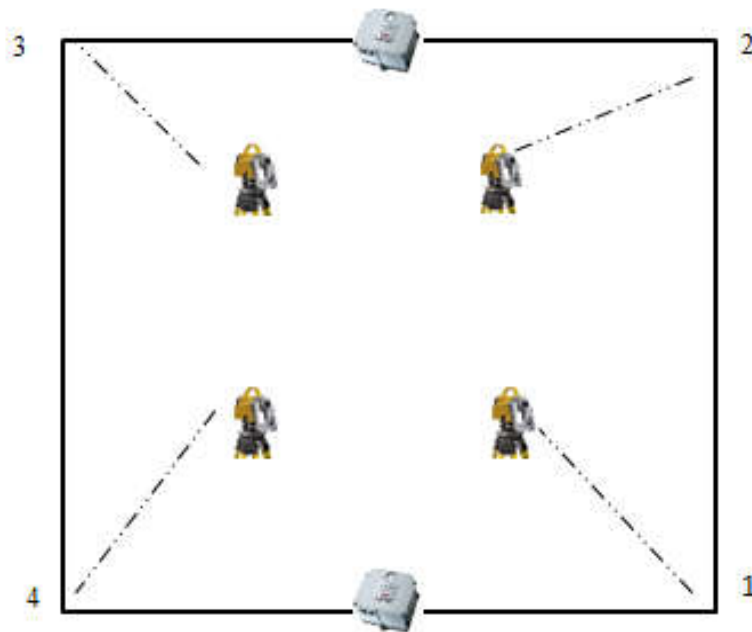


Рис. 3.9 Схема конструкції для проведення експерименту

1 та 2 кронштейни з мікрометричними гвинтами; 3 та 4 кронштейни закріплені жорстко; - місця розташування нівелірів; - місця розташування інклінометрів

Експеримент проводився з 18. 04. 2014 по 25. 04. 2014 р. Під час проведення експерименту цифрові інклінометри працювали безперервно, а нівеліри проводили вимірювання в автоматичному режимі щоденно 3 – 4 години. Кожного дня за допомогою кронштейнів з мікрометричними гвинтами та індикаторів годинникового типу задавався нахил конструкції (піднімання чи опускання) з різним кроком (1 мм, 0,5 мм, 0,25 мм), та різним інтервалом часу (15 хв, 10 хв, 5 хв).

В результаті експерименту одержано добові файли вимірів інклінометрами з інтервалом 0,4 сек., які представляють собою час виміру, величину нахилу по осі X та по осі Y (в мрад) і температуру навколишнього середовища. На рис. 3.10 представлено фрагмент такого файлу спостережень.

Time	Inc1.X	Inc1.Y	Temp.
9:34:11.8	+0.501	+0.124	+15.1
9:34:12.3	+0.501	+0.124	+15.1
9:34:12.7	+0.501	+0.125	+15.1
9:34:13.2	+0.501	+0.124	+15.1
9:34:13.6	+0.501	+0.124	+15.1
9:34:14.0	+0.501	+0.124	+15.1
9:34:14.5	+0.501	+0.124	+15.1
9:34:14.9	+0.501	+0.124	+15.1
9:34:15.4	+0.502	+0.124	+15.1
9:34:15.8	+0.501	+0.124	+15.1
9:34:16.2	+0.501	+0.124	+15.1
9:34:16.6	+0.501	+0.124	+15.1
9:34:17.0	+0.501	+0.124	+15.1
9:34:17.4	+0.501	+0.124	+15.0
9:34:17.8	+0.501	+0.124	+15.0
9:34:18.2	+0.501	+0.125	+15.0
9:34:18.6	+0.501	+0.124	+15.0
9:34:19.0	+0.501	+0.124	+15.0
9:34:19.4	+0.501	+0.125	+15.0
9:34:19.8	+0.501	+0.125	+15.0
9:34:20.2	+0.501	+0.124	+15.0
9:34:20.6	+0.501	+0.124	+15.0
9:34:21.0	+0.501	+0.125	+15.0
9:34:21.3	+0.502	+0.124	+15.0
9:34:21.7	+0.501	+0.124	+15.0
9:34:22.1	+0.501	+0.124	+15.0
9:34:22.5	+0.501	+0.124	+15.0
9:34:22.9	+0.501	+0.124	+15.0
9:34:23.3	+0.501	+0.124	+15.0
9:34:23.7	+0.501	+0.124	+15.0
9:34:24.1	+0.501	+0.125	+15.0
9:34:24.5	+0.501	+0.124	+15.1
9:34:24.9	+0.501	+0.124	+15.1
9:34:25.3	+0.501	+0.124	+15.1
9:34:25.7	+0.502	+0.124	+15.1

Рис 3.10. Фрагмент добового файлу вимірів інклінометром

Також, одержані щоденні файли високоточного геометричного нівелювання, один з яких приведено на рис. 3.11. Такий файл містить інформацію про дату та час спостережень, номер нівеліра, відліки по рейці та відстань до рейки.

18041 — Блокнот											
Файл	Правка	Формат	Вид	Справка							
For M5	Adr	2	KD1	10001	09:30:181	R	0.19292	m	HD	2.608	m
For M5	Adr	3	KD1	10002	09:45:181	R	0.19292	m	HD	2.609	m
For M5	Adr	4	KD1	10003	10:00:191	R	0.19392	m	HD	2.605	m
For M5	Adr	5	KD1	10004	10:15:191	R	0.19393	m	HD	2.605	m
For M5	Adr	6	KD1	10005	10:30:201	R	0.19485	m	HD	2.605	m
For M5	Adr	7	KD1	10006	10:45:201	R	0.19499	m	HD	2.600	m
For M5	Adr	8	KD1	10007	11:00:201	R	0.19607	m	HD	2.598	m
For M5	Adr	9	KD1	10008	11:15:211	R	0.19583	m	HD	2.606	m
For M5	Adr	10	KD1	10009	11:30:211	R	0.19690	m	HD	2.606	m
For M5	Adr	11	KD1	10010	11:45:221	R	0.19690	m	HD	2.606	m
For M5	Adr	12	KD1	10011	12:00:221	R	0.19783	m	HD	2.606	m
For M5	Adr	13	KD1	10012	12:15:231	R	0.19782	m	HD	2.606	m
For M5	Adr	14	KD1	10013	12:30:231	R	0.19882	m	HD	2.606	m
For M5	Adr	15	KD1	10014	12:45:241	R	0.19881	m	HD	2.606	m
For M5	Adr	16	KD1	10015	13:00:241	R	0.19987	m	HD	2.607	m
For M5	Adr	17	KD1	10016	13:15:251	R	0.19986	m	HD	2.607	m
For M5	Adr	18	KD1	10017	13:30:251	R	0.20080	m	HD	2.607	m
For M5	Adr	19	KD1	10018	13:45:251	R	0.20082	m	HD	2.607	m
For M5	Adr	20	KD1	10019	14:00:261	R	0.19987	m	HD	2.607	m
For M5	Adr	21	KD1	10020	14:15:261	R	0.19987	m	HD	2.607	m

Рис. 3.11 Файли високоточного геометричного нівелювання

3.3 Опрацювання результатів експериментальних досліджень

Вихідними даними для сумісного опрацювання результатів нівелювання та нахиломірних вимірів служили зміни перевищення точок визначені з геометричного нівелювання, кути нахилу конструкції по осях X та Y, а також координати точок 1 – 4 та місць розташування інклінометрів. Для опрацювання були використані результати експерименту 18.04. 014 р. (крок зміни перевищення точок 1мм), 22.04.2014 р. (крок зміни перевищення точок 0,5 мм), 23.04.2 014 р. (крок зміни перевищення точок 0,25 мм), 25.04.2014 р. (крок зміни перевищення точок 0,5 мм). Представлену методику та алгоритм сумісного зрівноваження реалізовано в пакеті MATHCAD.

Матриця A виразу (3.12) в нашому випадку буде мати вигляд

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Перший блок матриці 4 x 6 містить коефіцієнти при поправках до перевищення невідомих точок, які визначені першим інклінометром, другий блок – містить коефіцієнти при поправках до перевищення невідомих точок, які визначені другим інклінометром, та третій блок – коефіцієнти при поправках до перевищення невідомих точок, які визначені шляхом високоточного геометричного нівелювання.

Для одержання достовірних результатів сумісного зрівноваження, необхідно вірно встановити залежність між вагами вимірів геометричним нівелюванням та нахиломірних спостережень, які обчислюються за виразами (3.13 та 3.14). Для цього, перед остаточним сумісним зрівноваженням, було проаналізовано залежність зміни значення перевищення та його середньоквадратичної помилки від величини СКП виміру кута нахилу інклінометром m_i . В таблиці 3.1 приведені результати аналізу.

Таблиця 3.1

Залежність зміни перевищення та його СКП від величини СКП виміру кута нахилу інклінометром m_i

m_i , мрад	Зміна перевищення точок, мм				СКП визначення зміни перевищення точок, мм
	№1	№2	№3	№4	
0,005	0.387	0.679	-0.336	0.270	0.603
0,007	0.308	0.753	-0.272	0.211	0.462
0,009	0.242	0.812	-0.217	0.163	0.385
0,01	0.215	0.836	-0.194	0.143	0.358
0,05	0.014	1.000	-0.014	-0.000	0.098
0,1	0.004	1.007	-0.003	-0.007	0.050

Як видно з одержаних результатів, оптимальне значення СКП виміру кута нахилу інклінометром для умов експерименту становить $m_i=0,05$ мрад, що є на порядок більшим ніж точність виміру. На нашу думку це пов'язано з вибором одиниці ваги вимірних величин. В умовах експерименту перевищення точок, одержані з результатів високоточного геометричного нівелювання, були

визначені практично безпомилково за рахунок невеликої відстані від нівеліра до рейок (2,0 – 2,5 м), автоматичного взяття відліків та оптимальних умов спостережень. Перевищення точок одержані з результатів високоточного геометричного нівелювання в реальних польових умовах будуть визначені з більшою помилкою, а значить зросте довіра до даних одержаних при вимірюванні інклінометрами. Провівши розрахунки точності визначення зміни, перевищення в залежності від довжини ходу нівелювання II класу і нахиломірних вимірів в залежності від відстані між точками, була знайдена оптимальна відстань в межах 0,4 – 0,8 км, при якій, точності визначення зміни перевищення обома методами є приблизно однаковими (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2

Точність визначення зміни перевищення в залежності від довжини ходу

L, км	Гранична СКП визначення зміни перевищення точок, мм	
	Нівелювання II класу	Інклінометричні вимірювання
0,1	1,6	0,5
0,4	1,2	2,0
0,6	1,6	3,0
0,8	1,8	4,0
1,0	2,0	5,0
2,0	2,8	10,0
3,0	3,5	15,0
4,0	4,0	20,0

За результатами сумісного зрівноваження отримано зміни перевищення точок та СКП їх визначення (таблиці 3.3 – 3.6), а також обчислені величини відхилення зміни перевищення від еталонного значення (виміри перевищень індикатором годинникового типу) на основі яких побудовані графіки (рис. 3.12 – 3.15).

Таблиця 3.3

Зміна перевищення точок та його СКП

Дата та час вимірів	Зміна перевищення точок, мм				СКП визначення зміни перевищення точок, мм			
	№1	№2	№3	№4	№1	№2	№3	№4
18.04.2014								
9:45:00	0,014	1,000	-0,014	0,000	0,098	0,098	0,098	0,098
10:00:00	0,992	0,006	0,010	0,082	0,110	0,110	0,109	0,109
10:15:00	0,023	0,991	-0,027	-0,087	0,096	0,096	0,096	0,096
10:30:00	0,912	0,004	0,011	0,103	0,103	0,103	0,103	0,103
10:45:00	0,152	0,992	-0,015	0,012	0,104	0,104	0,103	0,103
11:00:00	1,067	-0,005	0,011	-0,003	0,106	0,106	0,106	0,106
11:15:00	-0,217	1,009	-0,017	0,006	0,099	0,099	0,098	0,098
11:30:00	1,058	-0,005	0,001	-0,005	0,107	0,107	0,106	0,106
11:45:00	0,016	1,000	-0,015	0,009	0,099	0,099	0,099	0,099
12:00:00	0,921	0,004	0,009	-0,013	0,092	0,092	0,092	0,092
12:15:00	0,005	1,000	-0,015	0,009	0,099	0,099	0,099	0,099
12:30:00	0,990	0,004	0,010	-0,005	0,100	0,100	0,100	0,100
12:45:00	0,010	1,298	-0,010	0,003	0,130	0,130	0,130	0,130
13:00:00	1,049	-0,005	0,002	0,004	0,108	0,108	0,108	0,108
13:15:00	0,017	1,743	-0,037	0,007	0,172	0,172	0,172	0,172
13:30:00	0,930	0,004	0,009	-0,033	0,090	0,091	0,090	0,090

Таблиця 3.4

Зміна перевищення точок та його СКП

Дата та час вимірів	Зміна перевищення точок, мм				СКП визначення зміни перевищення точок, мм			
	№1	№2	№3	№4	№1	№2	№3	№4
22.04.2014								
8:29:00	0,002	-0,505	0,008	-0,005	0,052	0,052	0,052	0,052
8:39:00	-0,562	0,022	-0,007	0,007	0,056	0,056	0,056	0,056
8:49:00	-0,008	-0,496	0,008	-0,004	0,051	0,051	0,051	0,051
8:59:00	-0,485	0,003	0,004	-0,002	0,050	0,050	0,049	0,049
9:09:00	0,011	-0,515	-0,002	-0,005	0,051	0,051	0,051	0,051
9:19:00	-0,466	-0,007	0,004	-0,061	0,052	0,052	0,052	0,052
9:29:00	-0,006	-0,495	0,009	0,063	0,047	0,048	0,047	0,047
9:39:00	-0,524	0,012	-0,006	-0,002	0,055	0,055	0,055	0,055
9:49:00	-0,008	-0,505	0,017	-0,005	0,050	0,050	0,049	0,049
9:59:00	-0,475	0,003	-0,005	0,017	0,047	0,047	0,047	0,047
10:09:00	-0,458	0,002	-0,015	-0,159	0,063	0,063	0,063	0,063
10:19:00	0,004	-0,494	0,018	0,073	0,046	0,046	0,046	0,046
10:29:00	-0,536	0,002	0,003	-0,079	0,063	0,063	0,063	0,063
10:39:00	0,001	-0,527	-0,078	0,004	0,062	0,062	0,062	0,062
10:49:00	-0,504	0,004	0,082	0,008	0,049	0,049	0,049	0,049
10:59:00	-0,008	-0,496	-0,070	-0,016	0,060	0,060	0,060	0,060
11:09:00	-0,466	-0,008	-0,072	0,016	0,050	0,050	0,050	0,050
11:19:00	-0,523	0,014	0,139	-0,010	0,053	0,053	0,053	0,053
11:29:00	-0,008	-0,496	-0,060	0,004	0,057	0,057	0,057	0,057
11:39:00	-0,465	-0,005	0,062	-0,002	0,046	0,046	0,046	0,046
11:49:00	-0,008	-0,505	0,008	0,015	0,050	0,050	0,050	0,050

Таблиця 3.5

Зміна перевищення точок та його СКП

Дата та час вимірів	Зміна перевищення точок, мм				СКП визначення зміни перевищення точок, мм			
	№1	№2	№3	№4	№1	№2	№3	№4
23.04.2014								
8:09:00	-0,023	-0,248	0,014	0,007	0,025	0,025	0,025	0,025
8:14:00	-0,199	-0,003	-0,003	-0,065	0,026	0,026	0,026	0,026
8:19:00	0,006	-0,247	0,005	0,066	0,024	0,024	0,024	0,024
8:24:00	-0,198	-0,003	-0,002	0,003	0,020	0,020	0,020	0,020
8:29:00	-0,025	0,267	-0,005	0,002	0,027	0,027	0,027	0,027
8:34:00	0,247	0,003	0,003	-0,013	0,023	0,023	0,023	0,023
8:39:00	-0,006	0,238	-0,004	0,002	0,025	0,025	0,025	0,025
8:44:00	0,198	0,003	0,002	0,017	0,021	0,021	0,021	0,021
8:49:00	0,004	0,248	-0,004	-0,017	0,024	0,024	0,024	0,024
8:54:00	0,247	-0,006	0,003	0,006	0,026	0,026	0,026	0,026
8:59:00	0,004	0,248	-0,005	0,002	0,025	0,025	0,025	0,025
9:04:00	0,267	0,004	0,004	0,016	0,029	0,029	0,029	0,029
9:09:00	-0,006	0,258	-0,005	-0,007	0,025	0,025	0,025	0,025
9:14:00	0,267	-0,006	0,003	-0,014	0,026	0,026	0,026	0,026
9:19:00	0,004	0,248	-0,004	0,002	0,025	0,025	0,025	0,025
9:24:00	0,250	-0,005	0,004	0,152	0,042	0,042	0,042	0,042
9:29:00	0,000	0,256	-0,006	-0,211	0,030	0,030	0,030	0,030
9:34:00	0,229	-0,006	0,003	0,065	0,029	0,029	0,029	0,029
9:39:00	0,016	0,258	-0,003	0,138	0,036	0,036	0,036	0,036
9:44:00	0,206	0,012	0,001	-0,139	0,013	0,013	0,013	0,013
9:49:00	0,003	0,247	-0,005	-0,056	0,024	0,024	0,024	0,024

Таблиця 3.6

Зміна перевищення точок та його СКП

Дата та час вимірів	Зміна перевищення точок, мм				СКП визначення зміни перевищення точок, мм			
	№1	№2	№3	№4	№1	№2	№3	№4
25.04.2014								
8:35:00	0,028	0,516	0,002	0,073	0,056	0,056	0,055	0,055
8:50:00	0,525	0,008	0,007	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060
9:05:00	0,017	0,505	-0,008	-0,063	0,049	0,049	0,049	0,049
9:20:00	0,446	0,007	0,004	0,003	0,045	0,045	0,045	0,045
9:35:00	0,008	0,505	-0,018	0,014	0,049	0,049	0,049	0,049
9:50:00	0,504	-0,003	0,016	-0,007	0,051	0,051	0,051	0,051
10:05:00	0,008	0,486	-0,008	0,014	0,048	0,049	0,048	0,048
10:20:00	0,514	0,007	-0,004	-0,017	0,051	0,051	0,051	0,051
10:35:00	0,017	0,496	0,001	-0,054	0,050	0,050	0,050	0,050
10:50:00	0,438	0,007	0,006	0,130	0,057	0,057	0,057	0,057

Таблиця 3.7

**СКП зміни перевищення точок одержаних з інклінометричних
спостережень**

Дата спостережень							
18.04.2014		22.04.2014		23.04.2014		25.04.2014	
Інклінометри							
№1	№2	№1	№2	№1	№2	№1	№2
0,312	0,320	0,165	0,169	0,079	0,081	0,177	0,182
0,350	0,359	0,179	0,184	0,084	0,086	0,192	0,197
0,307	0,315	0,162	0,166	0,077	0,079	0,157	0,161
0,328	0,337	0,158	0,162	0,065	0,066	0,144	0,148
0,331	0,339	0,164	0,168	0,085	0,088	0,157	0,161
0,339	0,348	0,167	0,171	0,073	0,075	0,163	0,167
0,314	0,322	0,151	0,155	0,080	0,082	0,155	0,159
0,340	0,349	0,174	0,179	0,067	0,069	0,164	0,168
0,317	0,325	0,158	0,162	0,077	0,079	0,158	0,163
0,293	0,300	0,149	0,153	0,082	0,084	0,182	0,187

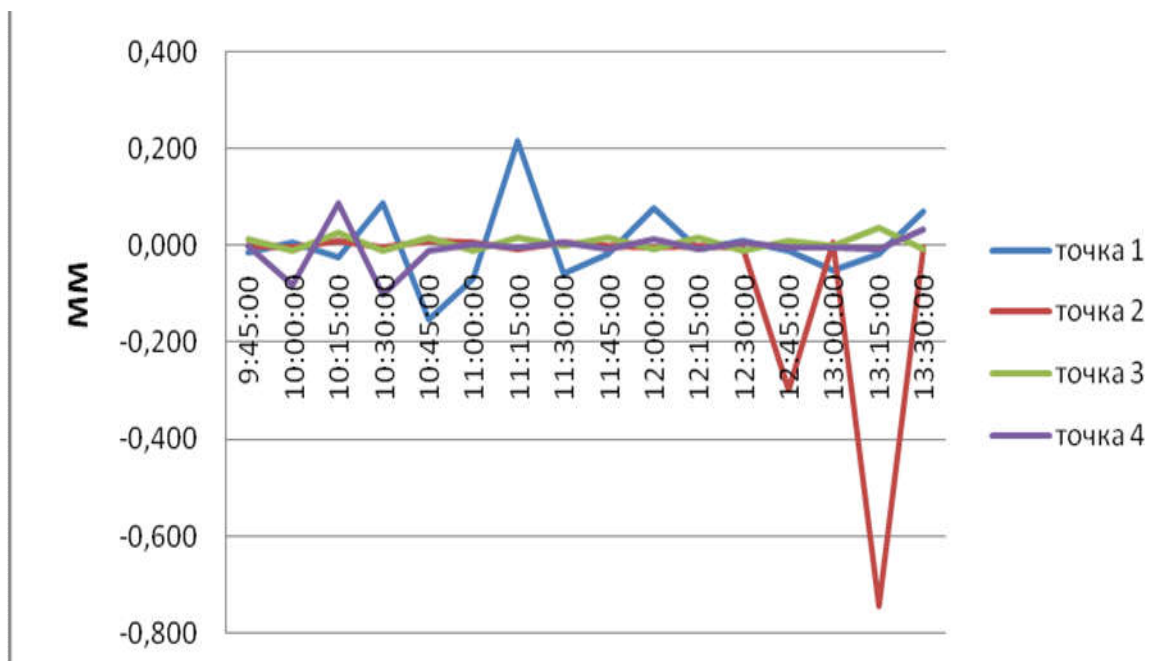


Рис. 3.12 Графік відхилення зміни перевищення від еталонного значення (експеримент проведено 18.04.2014 р.)

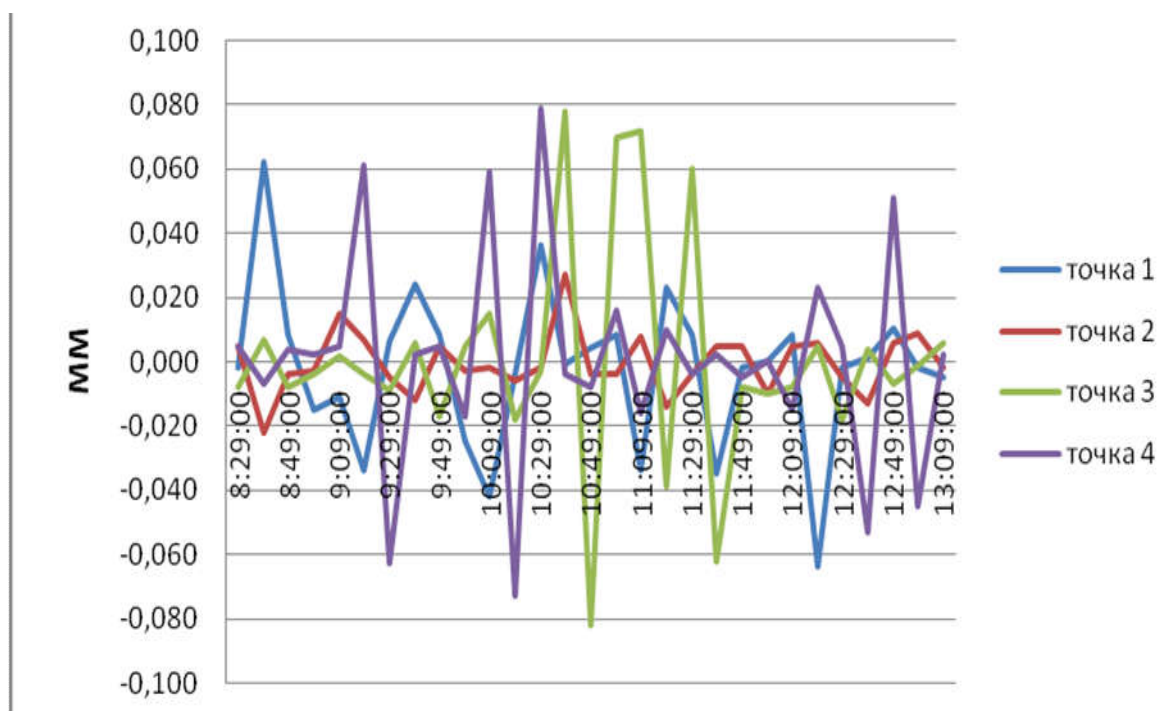


Рис. 3.13 Графік відхилення зміни перевищення від еталонного значення (експеримент проведено 22.04.2014 р.)

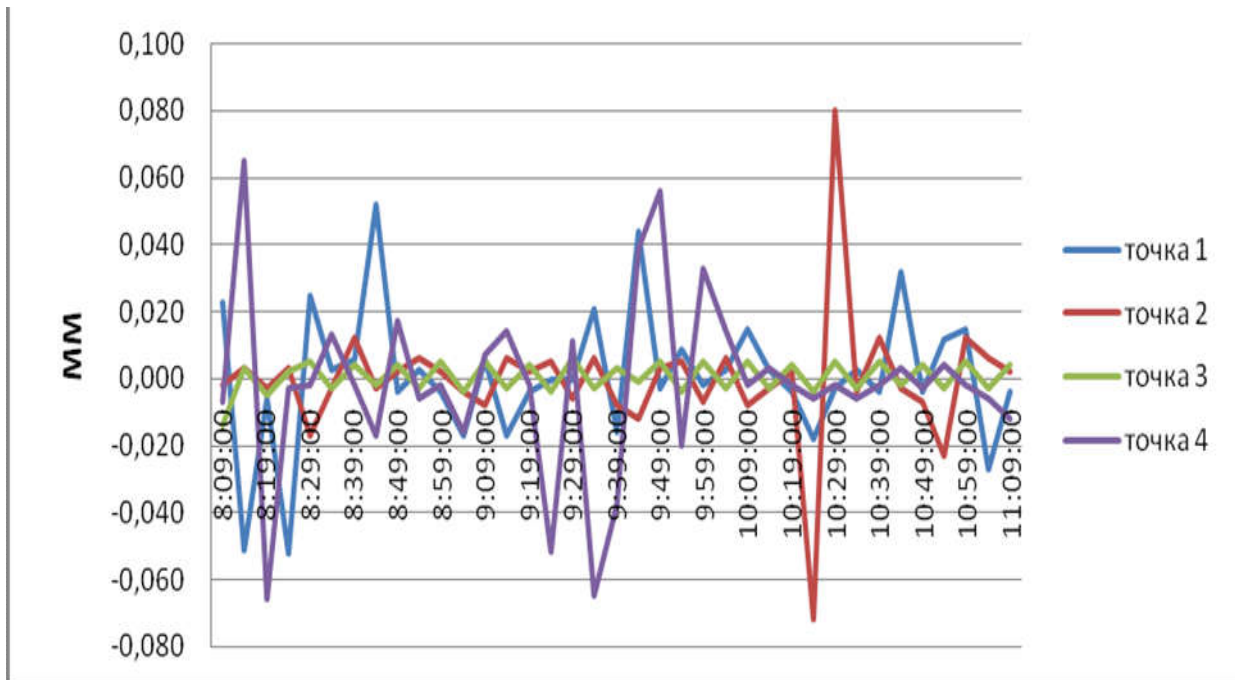


Рис. 3.14 Графік відхилю зміни перевищення від еталонного значення
(експеримент проведено 23.04.2014 р.)

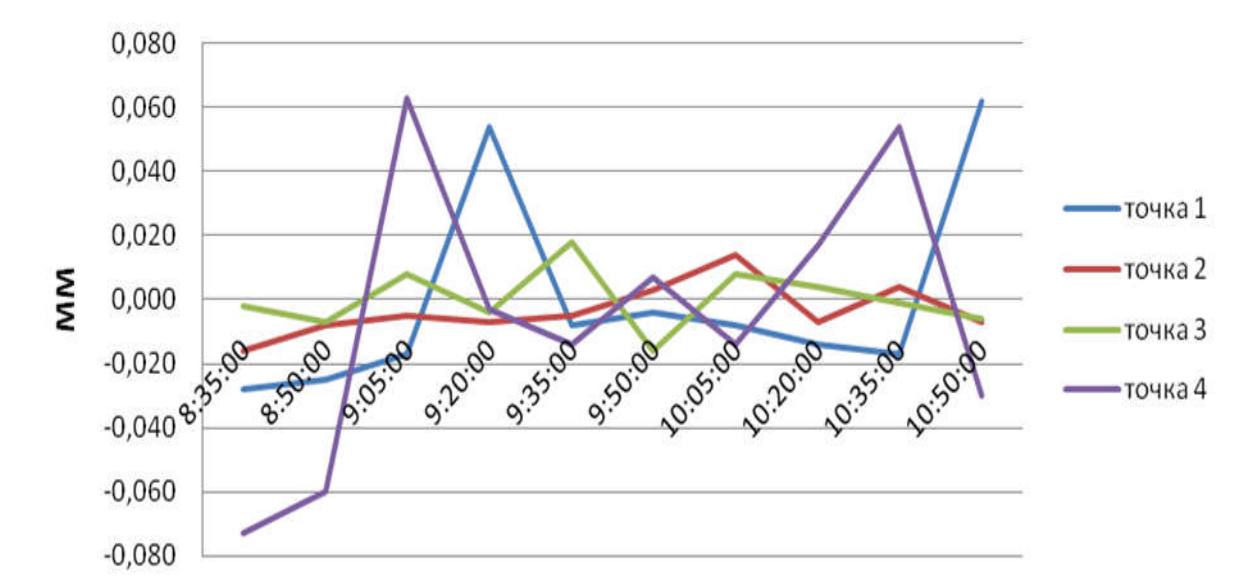


Рис. 3.15 Графік відхилю зміни перевищення від еталонного значення
(експеримент проведено 25.04.2014 р.)

Аналізуючи ці графіки можна зробити висновок, що відхил зміни перевищення точок від еталонного значення після сумісного зрівноваження коливається в межах 0,02 – 0,06 мм (за винятком декількох циклів спостережень де ці величини становлять 0,1 – 0,2 мм з технічних причин проведення експерименту). Це свідчить про те, що наш макетний зразок

представляє не зовсім жорстку основу. СКП визначення зміни перевищення точок одержаних з інклінометричних спостережень (таблиця 3.7) змінюються в межах 0,05 – 0,3 мм, що також свідчить про це припущення.

Висновки до розділу 3

1. Теоретично обгрунтовано можливість використання результатів нахиломірних вимірів інклінометрами для визначення кутів нахилу та перевищень в межах жорсткої моделі. Розроблено методику сумісного опрацювання результатів геометричного нівелювання та вимірів інклінометрами.
2. Проведено експеримент, метою якого була перевірка методу сумісного опрацювання результатів високоточного геометричного нівелювання та нахиломірних вимірів інклінометрами та для дослідження точності визначення перевищень одержаних цими методами. Відхил зміни перевищення точок від еталонного значення після сумісного зрівноваження коливається в межах 0,02 – 0,06 мм
3. Результати експерименту доводять, що нахиломірні виміри можуть бути використані в комплексних автоматизованих системах деформаційного моніторингу техногенно-навантажених територій, для визначення фонових (в межах жорсткої моделі) нахилів земної поверхні поряд з високоточним геометричним, гідростатичним чи гідродинамічним нівелюванням, які визначають аномальні (деформаційні) зміни земної поверхні. Такі результати можуть бути використані для подальшого районування досліджуваних техногенно-навантажених територій за спільними кінематичними характеристиками.

РОЗДІЛ 4. ЗАСТОСУВАННЯ НАХИЛОМІРНИХ ВИМІРІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТЕХНОГЕННО-НАВАНТАЖЕНИХ ТЕРИТОРІЙ

На території України мають місце ЕГП, що пов'язані з дією сили тяжіння (зсуви, обвали, осипи, лавини), з дією поверхневих і підземних вод (схилловий змив, ерозія, селі, карст, суфозія), просадка лісових порід, видобуток корисних копалин, який пов'язаний з порушенням геодинамічного стану окремих зон та ін. [43]. Означені процеси впливають на стан будівель, споруд, автомобільних та залізничних доріг, техногенно-небезпечних об'єктів і можуть призвести до часткового або повного їх руйнування, спричинення загибелі чи травмування людей, виникнення екологічних загроз для країни. Такі обставини диктують необхідність створення ефективної системи моніторингу за ЕГП на техногенно-навантажених територіях .

В останні роки кількість ділянок спостережень за ЕГП в Україні скоротилась майже в 6 разів (частина з них законсервовані, а частина втрачена). Основною причиною, що не дозволяє отримувати достовірні дані є недостатній рівень фінансування цього напрямку робіт. Система моніторингу за ЕГП знаходиться у вкрай незадовільному стані і потребує оновлення підходів при проведенні робіт у цілому [43]. Однією з таких ділянок спостережень є територія Стебницького калійного родовища.

4.1. Причини виникнення техногенної небезпеки на території Стебницького калійного родовища

Початок видобутку солі на території поблизу м. Стебник припадає на 12 століття. В цей час видобуток проводився відкритим способом. Починаючи з 17 – го століття видобуток солі здійснюється підземним способом. В 1848 році розпочалась прохідка двох шахтних стовбурів «Кюбек» та «Ляриш», які по завершенню цих робіт сягнули глибини 221 м., та 151 м відповідно. Видобуток солі за часів Радянського Союзу та незалежності України проводило Стебницьке державне гірничо-хімічне підприємство (ДГХП) «Полімінерал», в склад якого входили рудник №1 та №2. До 1988 року тут щороку видобували

понад три мільйони тонн калійної руди. За роки роботи підприємства на декількох підземних горизонтах від 90 до 370 метрів утворилися порожнини об'ємом понад 30 млн. кубічних метрів і завдовжки десятки кілометрів. Після Бухарестського землетрусу в Румунії у 1978 році відбулася зміна гідрологічного режиму рудника №2. Його почала заповняти прісна вода, яка є загрозою для соляних родовищ. У 1989 році через неефективність процесу збагачення підприємство було зупинено на реконструкцію, а фактично виробництво почало згортатися (рис. 4.1).



Рис.4.1 Стебницьке ДГХП “Полімінерал” станом на 1999 р.

Внаслідок технічних і екологічних проблем рудника №2 активізувався процес просідання території західного флангу західного поля згаданого рудника (рис 4.2). В 2000 р. там на площі 4,5 га утворилися 4 карстові лійки, з максимальним просіданням – 731мм. Уся карстова зона вкрита концентричними тріщинами розмірами від кількох сантиметрів до 0,5-0,7м і глибиною до 3-4 м.

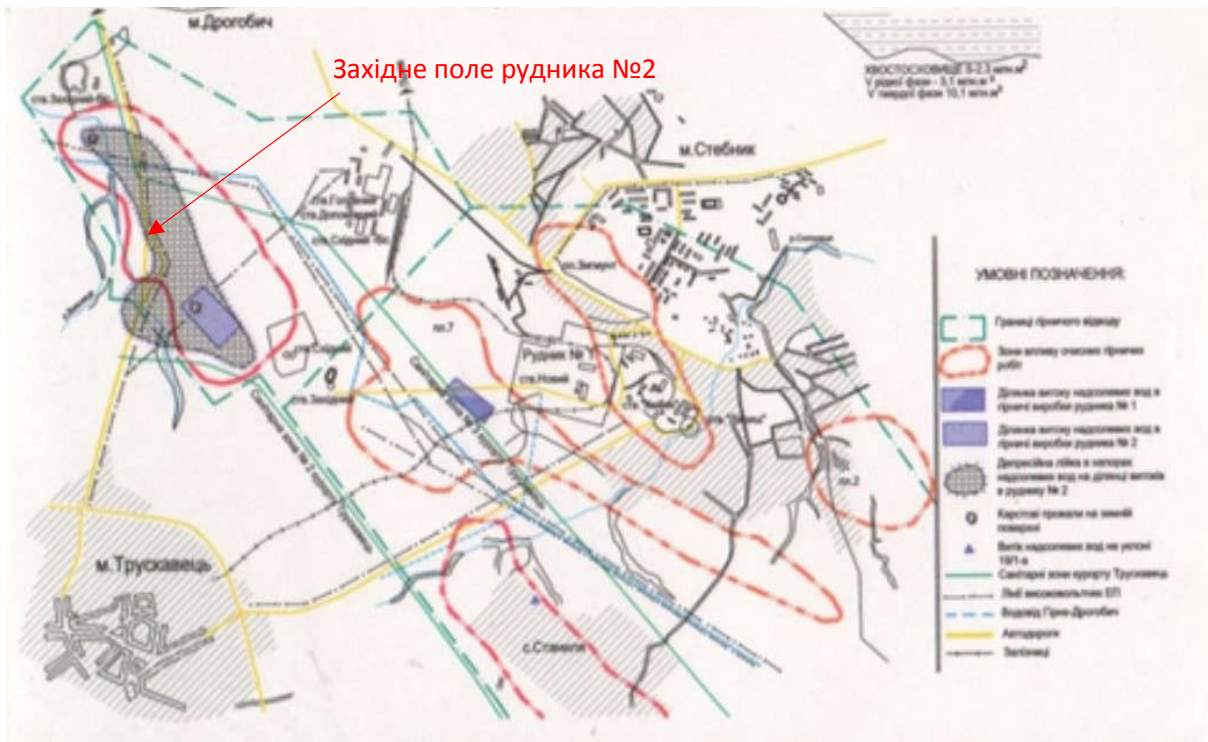


Рис.4.2 Схематичний план техногенно – екологічної ситуації на Стебницькому ДГХП «Полімінерал»

Ці проблеми з роками загострились під впливом двох факторів:

- наявністю великого об'єму незакладених порожнин відпрацьованих камер (міжкамерні цілики по своїх стійкісних характеристиках розраховані на тимчасову роботу без закладки порожнин камер і за межами розрахункового часу існування вони поступово втрачають несучу здатність та не можуть забезпечувати стійкість гірничого масиву та донної поверхні);
- попадання ґрунтових вод в порожнини відпрацьованих камер з подальшим руйнуванням ціликів та просіданням земної поверхні (рис 4.3).

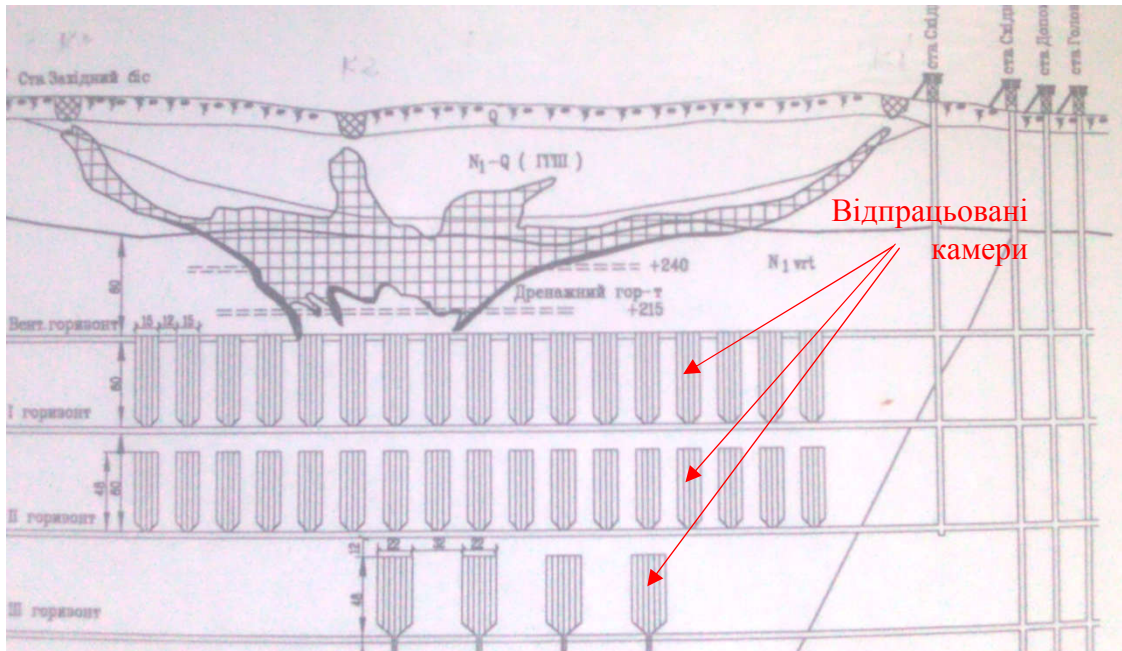


Рис. 4.3 Схема утворення провалів на території рудника №2

30 вересня 2017 р. на західному фланзі західного шахтного поля рудника № 2 утворилось карстове провалля діаметром 300 м та завглибшки 30 – 50 метрів (рис. 4.4). У результаті утворення провалля пошкоджено дві опори лінії електропередач 35 кВ. Відстань від карстового провалля до дороги становить 300 м та до найближчих будівель 800 - 900 м.



Рис. 4.4 Провалля, яке утворилося 30 вересня 2017 р

2 листопада 2017 р. на цій ж території виявлено карстове провалля розміром 3 на 2 м та глибиною 3 м у яке впадає річка Вишниця (рис 4.5). Це провалля знаходиться на відстані 500 м від найближчих житлових будинків с. Модричі Дрогобицького району, 300 м від автодороги Дрогобич – Трускавець та в 50 м від карстового провалля проходить високовольтна лінія електропередач.



Рис. 4.5 Провалля, яке утворилося 2 листопада 2017 р

Збільшення інтенсивності просідання території західного шахтного поля рудника №2 неминуче призведе до техногенної катастрофи з непередбачуваними наслідками. Своєчасне реагування на виникнення подібних техногенних руйнувань земної поверхні вимагає перманентного ведення моніторингу, а саме, визначення деформацій та осідань земної поверхні в реальному часі. Для здійснення таких моніторингових досліджень були використані високоточні цифрові інклінометри.

4.2 Моніторинг території шахтних полів рудника №2 Стебницького калійного родовища шляхом проведення високоточних нахиломірних вимірювань

Для проведення моніторингу створена система моніторингу території в межах гірничого відводу шахтних полів рудника №2 Стебницького калійного родовища, яка складається з двох нахиломірних станцій Nivel 210 [36]. Інклінометри були встановлені в підвальних приміщеннях школи в селі Модричі, та готелю «Візит», який розташований на околиці міста Трускавець (рис. 4.6). Для реалізації методики запропонованої у розділі 3 даної роботи були визначені координати місць встановлення інклінометрів (таблиця 4.1) та проведено їх взаємне орієнтування.



Рис. 4.6 Місця встановлення інклінометрів

Таблиця 4.1

Координати місць встановлення нахиломірних станцій

Назва станції	Координати	
	В (широта)	Л (довгота)
Модричі	49°18'48"	23°29'25"
Візит	49°17'51"	23°30'32"

До місць встановлення інклінометрів прокладено мережу живлення 220 V та лінію Інтернет. Після чого, інклінометри були під'єднані до комп'ютерів для

одержання та опрацювання результатів вимірів у реальному часі (рис. 4.7 і 4.8). Для автоматизованого збору інформації з високоточних цифрових інклінометрів Nivel 210 створено спеціальне програмне забезпечення Nivel Data Collector.



Рис. 4.7 Нахиломірна станція Nivel 210 встановлена в школі с. Модричі



Рис. 4.8 Нахиломірна станція Nivel 210 встановлена в готелі «Візит»

Автоматизований збір даних з інклінометрів виконувався щосекунди і кожні десять хвилин результати вимірювань записувалися у відповідні файли. Для опрацювання результатів нахиломірних вимірів розроблена методика, яка

реалізована в середовищі MATHCAD. Для видалення помилкових вимірів одержані часові серії кутів нахилу по осях «X» та «Y» відфільтровувалися, після чого обнулювалися на початок кожної доби по обох нахиломірних станціях. На рис 4.9, 4.10 приведені графіки зміни кутів нахилу по осях «X» та «Y» нахиломірних станцій «Візит» та «Модричі» за одну добу (23.01.2018 р).

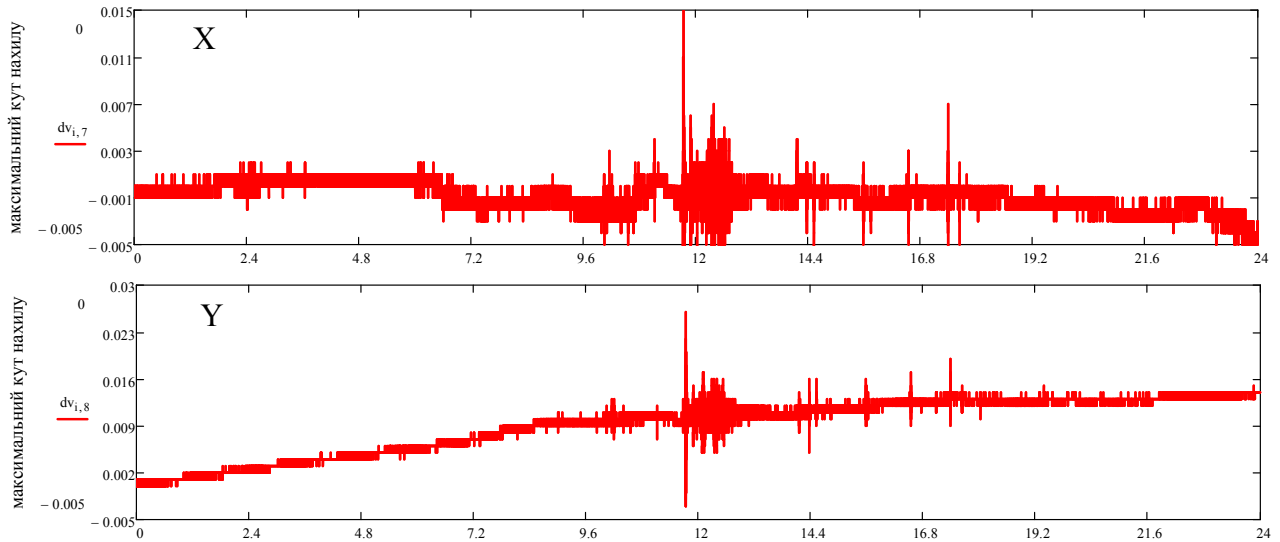


Рис 4.9 Часові серії зміни кутів нахилу по осях «X» та «Y» для станції «Візит» на 23.01.2018 р

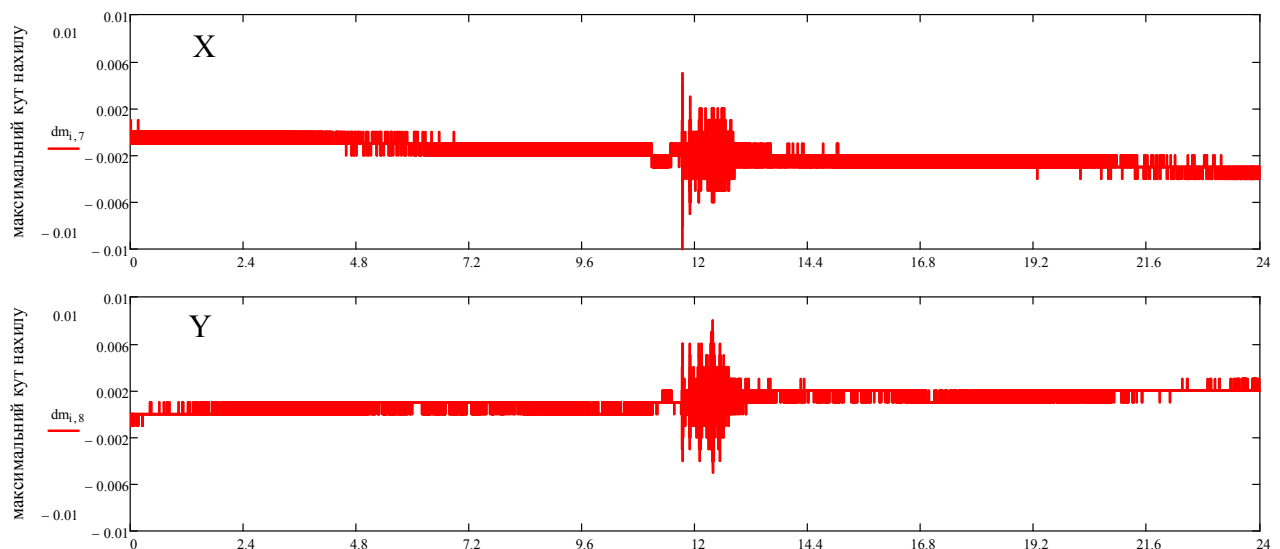


Рис 4.10 Часові серії зміни кутів нахилу по осях «X» та «Y» для станції «Модричі» на 23.01.2018 р

Після цього, за формулою (3.2) обчислювалися зміни максимального кута нахилу обох нахиломірних станцій (рис 4.11).

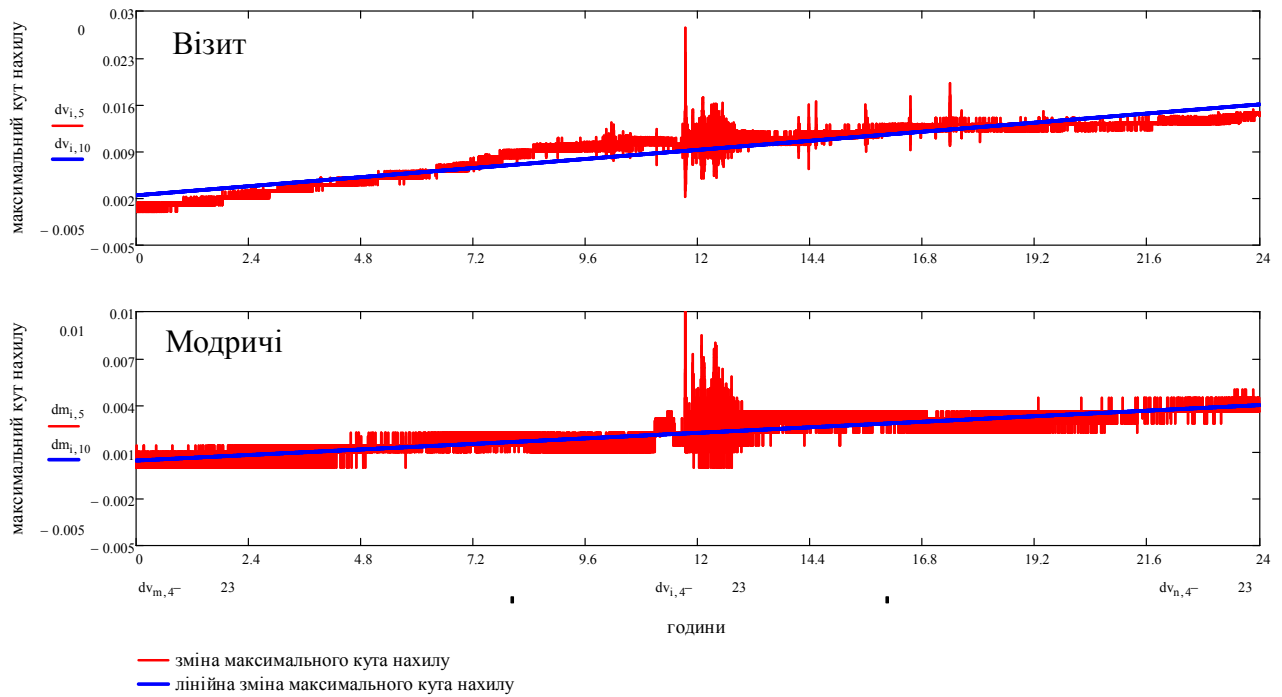


Рис. 4.11 Зміна максимального кута нахилу нахиломірних станцій на 23.01. 017 року

Для кожного виміру часової серії зміни максимального кута нахилу (в добовому файлі таких вимірів є 86400) складено відповідні рівняння $i = Vt + b$. Способом найменших квадратів знайдено коефіцієнти цих рівнянь V та b .

За цими коефіцієнтами знаходимо модельні значення зміни максимального кута нахилу часової серії:

$$i_{\text{модел}} = Vt + b. \quad (4.2)$$

За різницею $\delta_i = i_{\text{модел}} - i$ знаходимо СКП визначення значення зміни максимального кута нахилу (4.3):

$$m_i = \sqrt{\frac{\sum \delta_i \delta_i}{n-2}} \quad (4.3)$$

Аналогічні рівняння складаємо для кожної з осей «X» та «Y» та за формулами (4.4 – 4.6) знаходимо зміну азимуту максимального кута нахилу α_{max} та точність його визначення $m_{\alpha_{\text{max}}}$

$$\alpha_{\max} = \operatorname{arctg} \frac{i_X}{i_Y}, \quad (4.4)$$

$$\alpha_{\text{модел}} = \operatorname{arctg} \frac{i_{\text{модел}X}}{i_{\text{модел}Y}}, \quad (4.5)$$

$$m_\alpha = \frac{\sqrt{i_y^2 m_x^2 + i_x^2 m_y^2}}{i_x^2 + i_y^2}. \quad (4.6)$$

В таблиці 4.2 приведені обчислені за цією методикою зміни середньодобової швидкості максимального кута нахилу та точність його визначення, зміну величини кута нахилу, а також зміну азимуту максимального кута нахилу та точність його визначення для нахиломірних станцій «Візит» та «Модричі» за 23.01.2018 р.

Таблиця 4.2

Опрацювання результатів часової серії за 23.01.2018 р.

Параметри Назва станції	i_{\max} , мрад	m_i , мрад	α_{\max} , °	m_α , °
Візит	0,0136	0,0013	91,3541	5,6231
Модричі	0,0040	0,0010	249,0770	8,1240

На графіках (рис 4.12 – 4.17) приведені обчислені результати для нахиломірних станцій «Візит» та «Модричі» за період з 31.12.2017 по 03.02.2018 року.

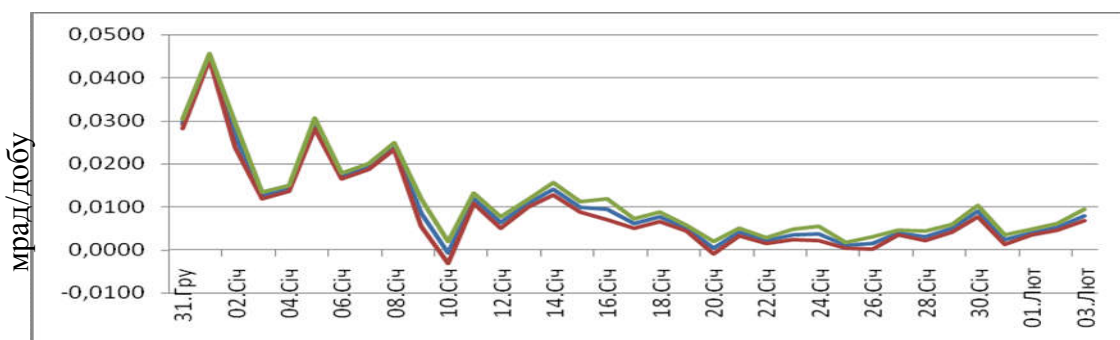


Рис.4.12 Зміна середньодобової швидкості максимального кута нахилу на станції "Візит" та точність його визначення

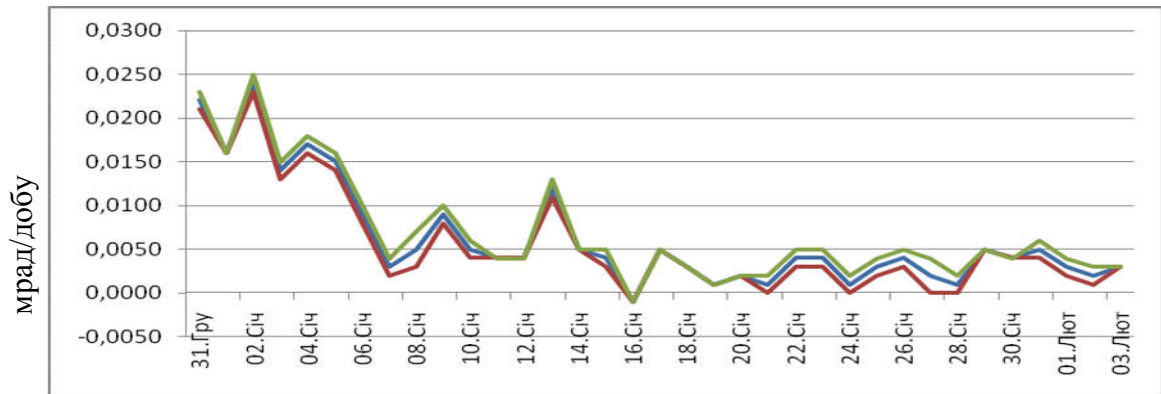


Рис.4.13 Зміна середньодобової швидкості максимального кута нахилу на станції "Модричі" та точність його визначення

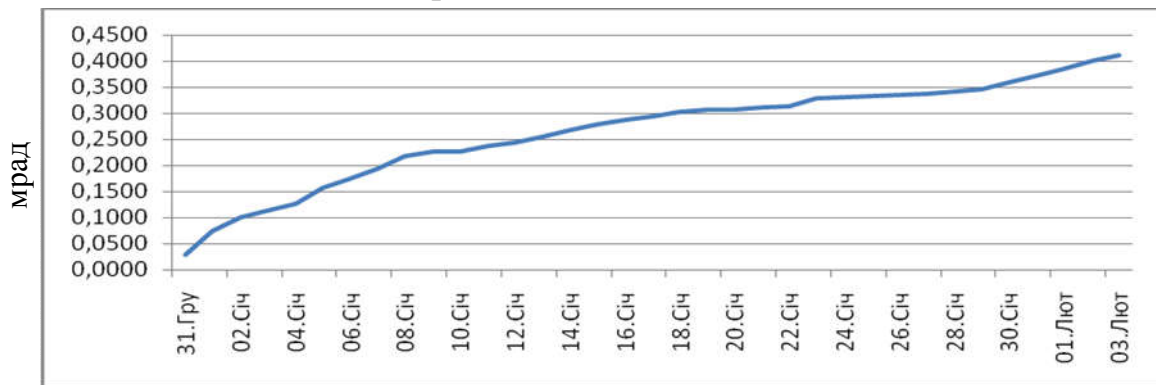


Рис.4.14 Зміна величини кута нахилу на станції "Візит"

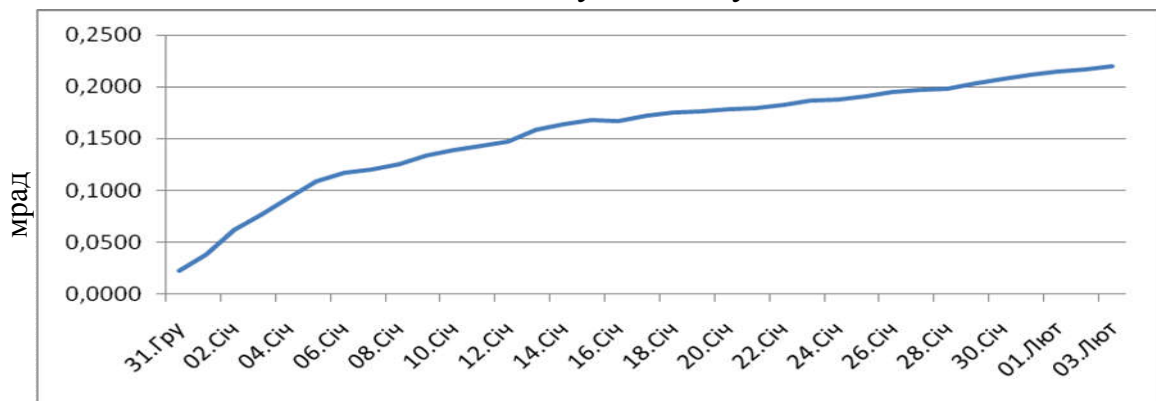


Рис.4.15 Зміна величини кута нахилу на станції "Модричі"

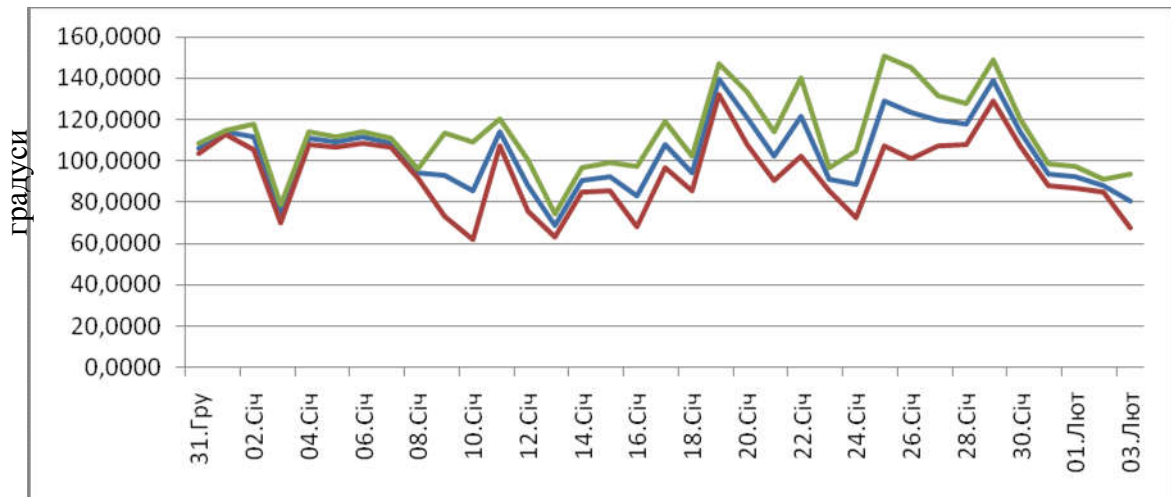


Рис.4.16 Зміна азимуту максимального кута нахилу на станції "Візит" та точність його визначення

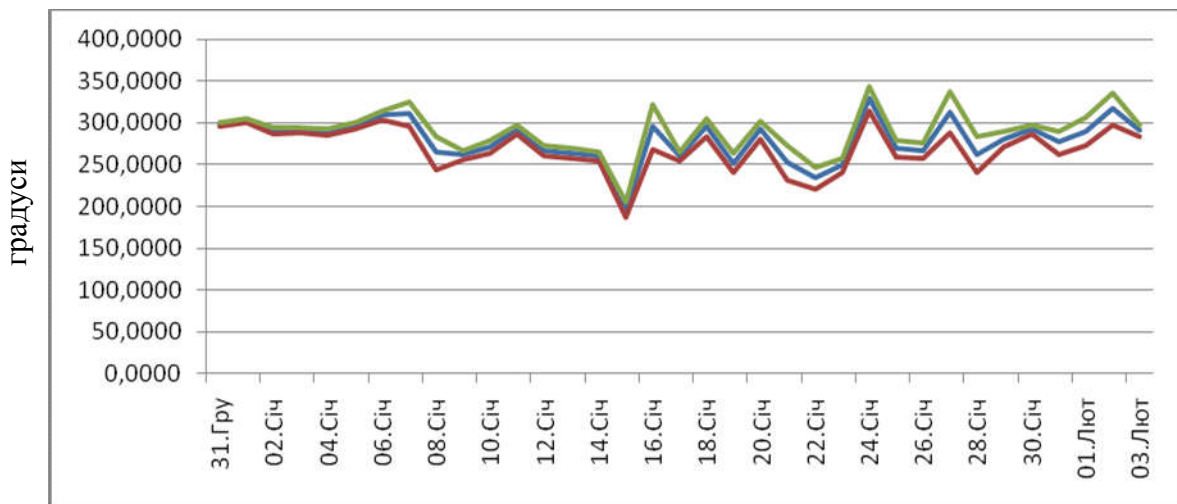


Рис.4.17 Зміна азимуту максимального кута нахилу на станції "Модричі" та точність його визначення

Середня швидкість зміни максимального кута нахилу станції «Візит» до 13.01.змінювалася в межах 0,045 – 0,010 мрад/добу, а станції «Модричі» в межах 0,025 – 0,005 мрад/добу. Починаючи з 13.01.2018 р. швидкість зменшилася і становить 0,005 та 0,002 мрад/добу відповідно для нахиломірних станцій «Візит» та «Модричі», що свідчить про завершення періоду стабілізації нахиломірних станцій. Величина кута нахилу після періоду стабілізації для станції «Візит» становить 0,15 мрад, а для станції «Модричі» – 0,05 мрад. Азимут максимального кута нахилу по станції "Модричі" становить близько 300° , а по станції "Візит" – 100° . Точність визначення азимуту максимального кута нахилу становить $5 - 15^{\circ}$ для станції «Візит» та $2 - 10^{\circ}$ для станції

«Модричі». На основі одержаних результатів нами було проведено умовне районування території шахтного поля на два блоки з різним напрямком нахилу, які утворюють прогин території західного флангу рудника №2 (рис. 4.18). Межа поділу території на блоки збігається з місцем провалля в руслі річки Вишниця, яке утворилося 2.11.2017 року.

Величини осідання, які обчислені за формулою (3.6) в місці імовірної лінії поділу території на блоки становить 50 мм та 60 мм на рік відповідно від станції «Візит» та «Модричі».

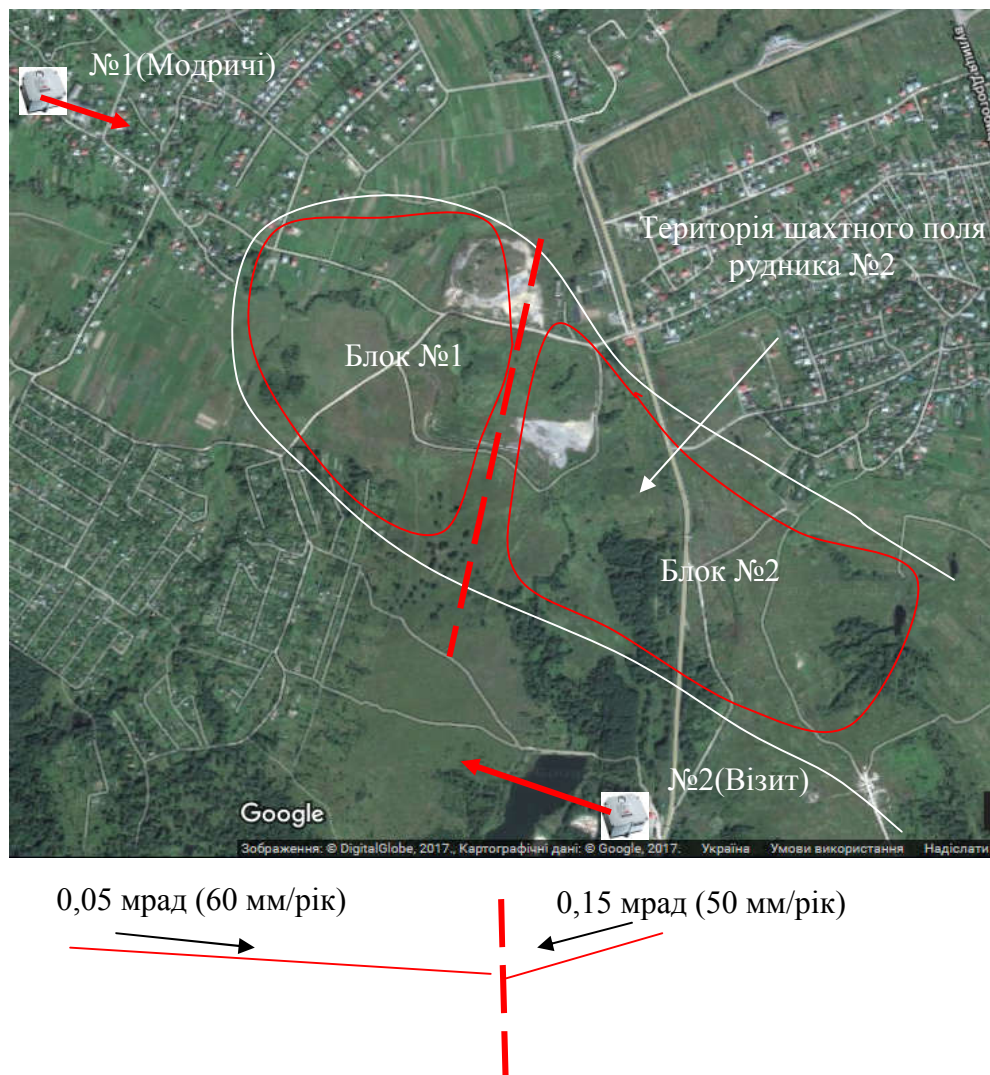


Рис. 4.18 Середні напрямки максимального кута нахилу зафіксовані нахиломірними станціями «Візит» і «Модричі», імовірна лінія поділу території на блоки та величина осідання території шахтного поля

За період з 12.05.2016 по 15.11.2017 фахівцями центру прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля був проведений

моніторинг вертикальних зміщень території ГХП «Полімінерал» з використанням інтерферометричних методів обробки супутникових радарних вимірювань [67].

Результати моніторингу вертикальних зміщень території ГХП «Полімінерал» з використанням інтерферометричних методів обробки супутникових радарних вимірювань підтверджують гіпотезу поділу досліджуваної території на блоки за результатами нахиломірних спостережень, а величини осідань території шахтного поля в районі лінії поділу практично збігаються в обох методах спостережень (40 – 60 мм/рік – радарна інтерферометрія та 50 – 60 мм/рік – нахиломірні виміри) (рис. 4.19).

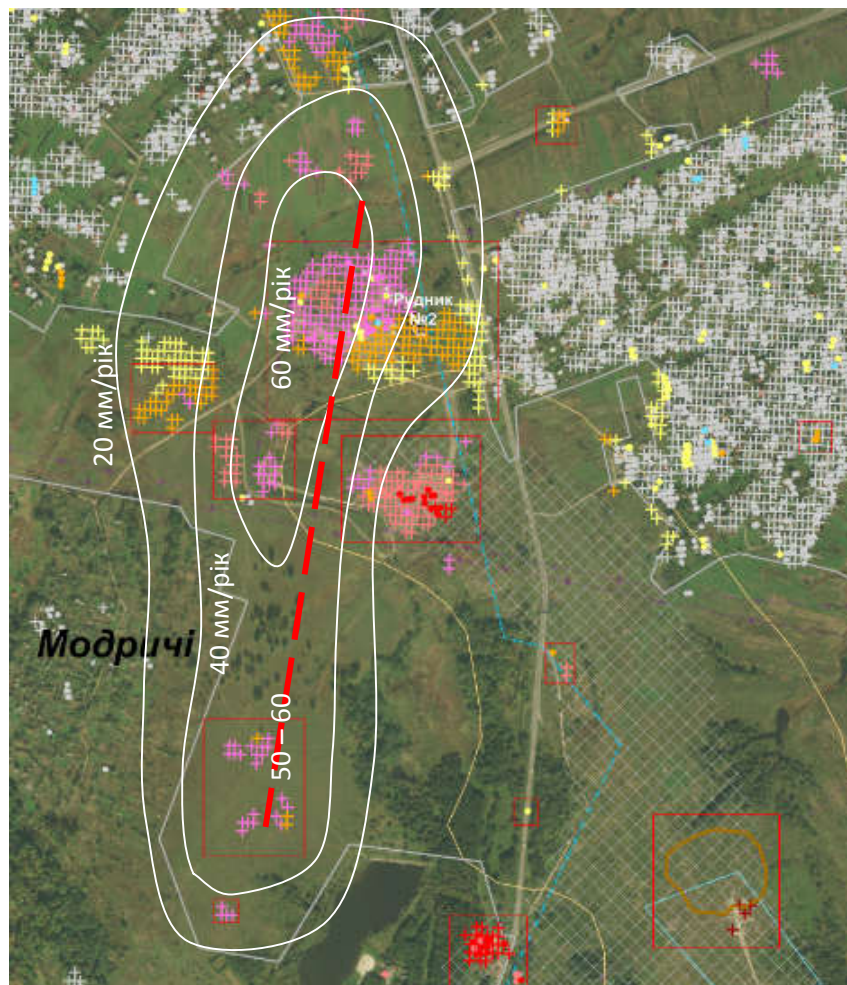


Рис 4.19 Ізолінії швидкості вертикальних зміщень та імовірна лінія поділу території на блоки та величини осідання території

Одержані результати спостережень підтверджують можливість використання нахиломірних спостережень для дослідження кінематики техногенно-навантажених територій. За даними одночасних спостережень декількох нахиломірних станцій можливе визначення місць локальних підземних деформаційних процесів.

4.3 Визначення місця розташування підземних обвалів за результатами нахиломірних спостережень

Стрибки максимального кута нахилу, які фіксуються нахиломірними станціями (рис. 4.11), очевидно пов'язані з руйнівними процесами, які відбуваються у гірничих виробітках. За даними одночасних спостережень двох нахиломірних станцій, з'являється можливість визначити місцеположення джерела коливань максимального кута нахилу (рис 4.19). Для знаходження місця підземного обвалу нам необхідно знати наступні величини:

- Координати місць встановлення інклінометрів №1 та 2;
- Величини азимутів максимальних коливань φ_1, φ_2 .

За цими даними обчисливши пряму кутову засічку ми одержуємо координати місця розташування підземного обвалу.

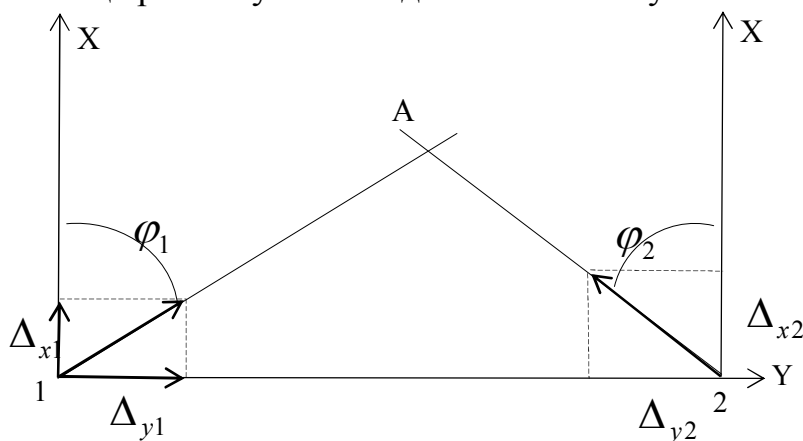


Рис 4.19 Пояснення до методики визначення місця розташування підземних обвалів

Знаходження величин азимутів максимальних кутів нахилу φ_1, φ_2 для обох нахиломірних станцій здійснюється у середовищі MATHCAD за такою методикою. На першому етапі з часових серій зміни максимального кута

нахилу нахиломірних станцій вибирають події коливання яких є більшими за фонові (0,05 мрад) та фіксують час початку та кінця події для обох нахиломірних станцій (рис. 4.20).

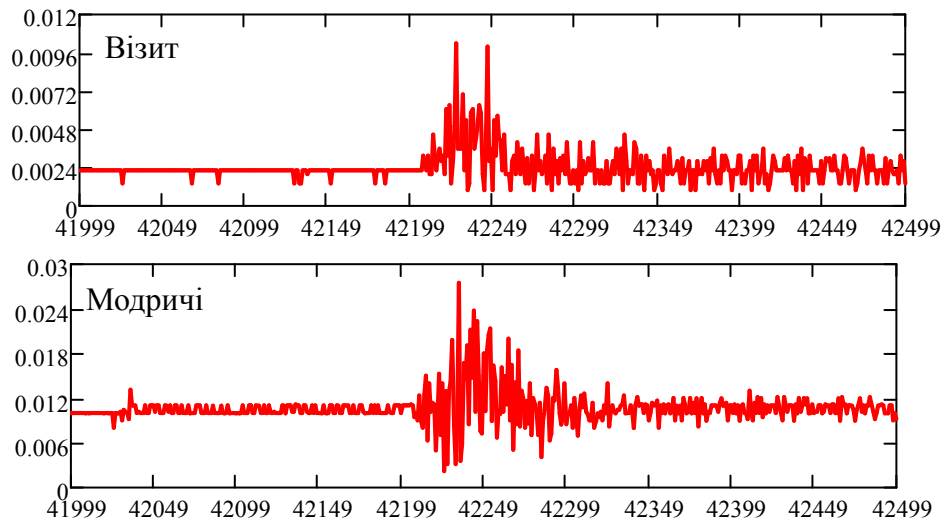


Рис 4.20 Часові серії зміни максимального кута нахилу нахиломірних станцій з коливаннями більшими за фонові зафіксовані 23.01.2018р.

Після цього, знаходимо спільні інтервали (на рис. 4.20, інтервал 42199 – 42299) для обох нахиломірних станцій коли коливання є більшими за фонові. У таких інтервалах фіксують усі коливання по осях X та Y та знаходять середні значення зміни максимального кута нахилу $i_{xi_{сер}}$, $i_{yi_{сер}}$, а також відхили від середнього значення зміни максимального кута нахилу Δ_{xi} , Δ_{yi} (рис 4.21).

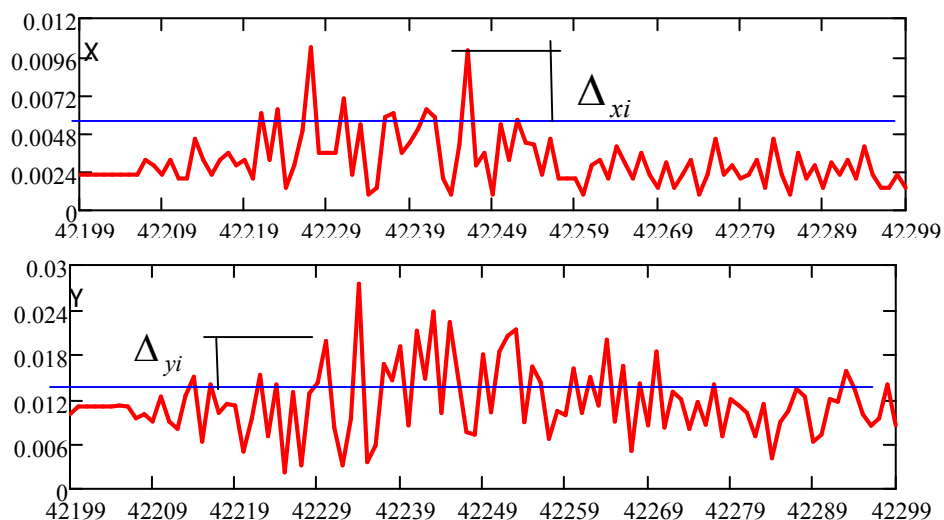


Рис. 4.21 Визначення величин Δ_{xi} , Δ_{yi} у вибраному інтервалі для нахиломірної станції «Візит»

Використовуючи величини $\Delta_{x_i}, \Delta_{y_i}$ за формулами (19) обчислюють коваріаційні матриці (K) для обох станцій:

$$\sigma_{\Delta x} = \sqrt{\frac{\sum \Delta_x^2}{n}}; \sigma_{\Delta y} = \sqrt{\frac{\sum \Delta_y^2}{n}}; K_{\Delta x \Delta y} = \sqrt{\frac{\sum \Delta_x \Delta_y}{n}}; K = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta x} & K_{\Delta x \Delta y} \\ K_{\Delta x \Delta y} & \sigma_{\Delta y} \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

де n – кількість вимірів відхилів від середнього значення зміни максимального кута нахилу $\Delta_{x_i}, \Delta_{y_i}$ у вибраному інтервалі.

У подальшому знаходять власні числа коваріаційних матриць для обох станцій, які ототожнюють з великою та малою піввіссю еліпса. Велика піввісь a характеризує величину («бал події»), а кут, утворений напрямком великої півосі та осі X, є азимутом максимального коливання φ . Під «балом події» розуміємо величину амплітуди коливання зафіксовану інклінометром. Один бал відповідає величині 0,001 мрад. За цими даними обчислюємо координати місць підземних обвалів.

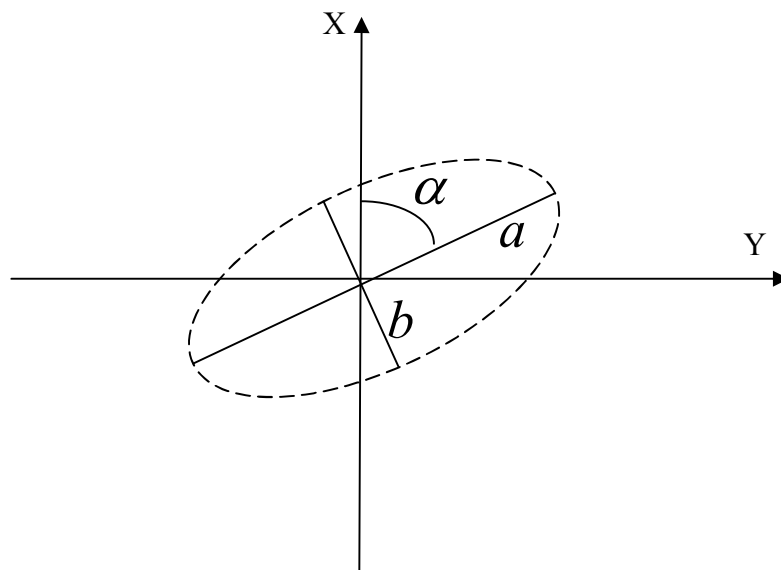


Рис. 4.22 Знаходження азимуту максимального коливання

За час проведення нахиломірних спостережень (26.12.2017 – 03.02.2018 років) зафіксовано цілий ряд підземних обвалів на території рудника №2 (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Підземні обвали зафіксовані на території рудника №2

№ події	Дата	Час	Координати		Умовний бал
			В (широта)	L (довгота)	
1	2018-01-09	07:07:03	49°18'46"	23°30'49"	1.9
2	2018-01-12	10:51:34	49°18'08"	23°30'58"	0.96
3	2018-01-17	03:49:23	49°18'48"	23°30'26"	2.16
4	2018-01-18	23:02:11	49°18'28"	23°31'04"	1.2
5	2018-01-22	16:23:03	49°17'43"	23°31'07"	0.85
6	2018-01-23	11:43:50	49°17'57"	23°31'01"	9.9
7	2018-01-27	06:28:03	49°17'48"	23°30'36"	1.06
8	2018-01-30	12:45:12	49°18'33"	23°30'32"	1.36

На рисунку 4.23 зображено досліджувану територію рудника №2 з нанесеними місцями концентрованих деформацій земної поверхні одержаних з аналізу результатів інтерферометричної обробки радарних вимірювань (червоні квадрати) та місцями підземних обвалів, які зафіксовані нахиломірними станціями (жовті кола) [67]. Цілий ряд підземних обвалів (№№ 1, 4, 6, 7, 8), які зафіксовані нахиломірними станціями розташовані у зонах деформацій земної поверхні одержаних за даними обробки супутникових радарних вимірювань. Причому, підземні обвали з більшим балом розташовані в районах найбільш небезпечних зон №16, №37, №38 визначених за даними супутникового радарного моніторингу

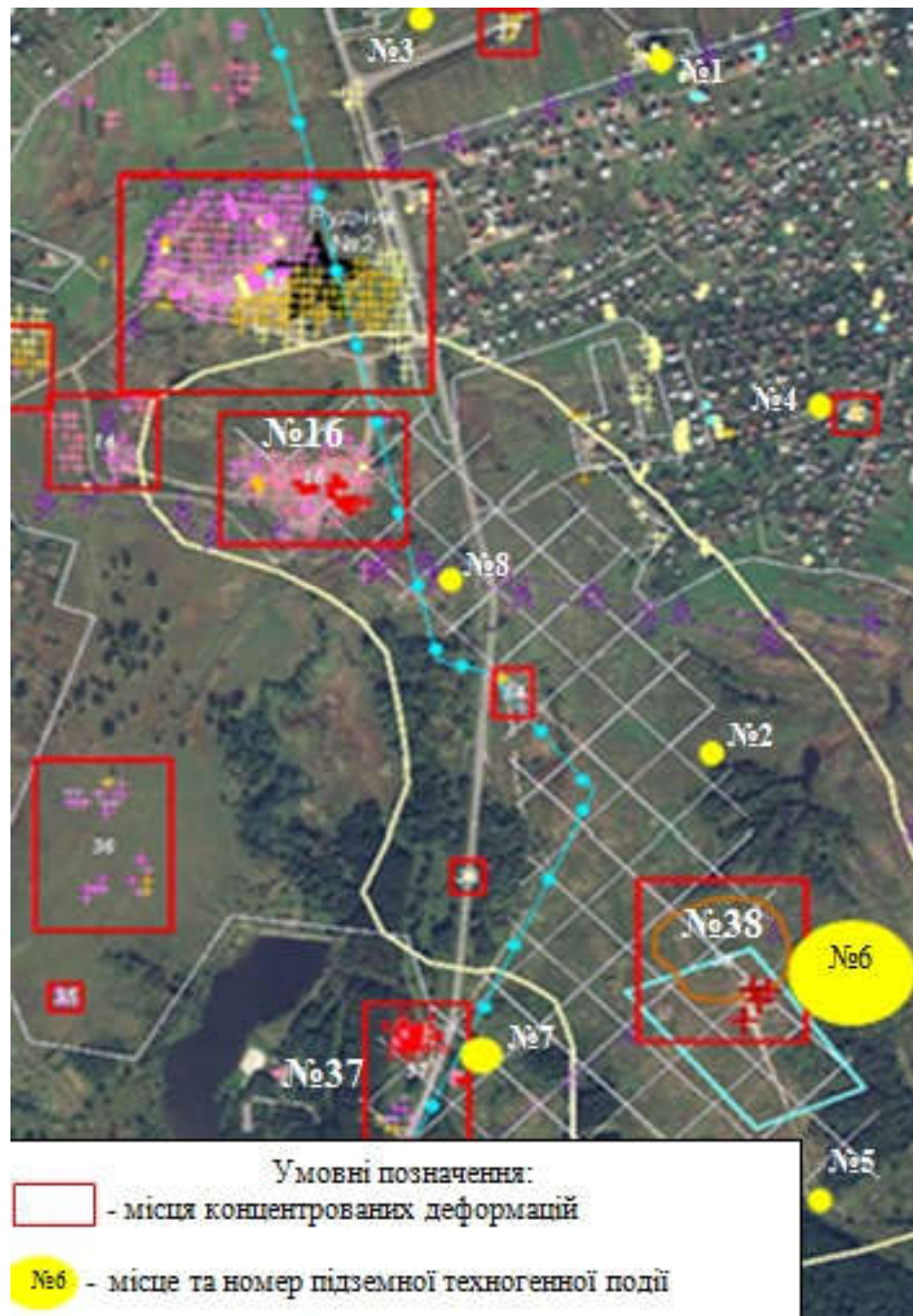


Рис. 4.23 Територія рудника №2 з вказаними зонами де відбуваються підземні обвали

Висновки до розділу 4

1. Створена система моніторингу території в межах гірничого відводу шахтних полів рудника №2 Стебницького калійного родовища, яка дозволяє в режимі реального часу одержувати інформацію про величину та швидкість зміни максимального кута нахилу та його азимут.

2. За одержаними даними часових серій зміни максимального кута нахилу проведено умовне районування території шахтного поля на два блоки з різним напрямком та величиною нахилу (блок №1 північно-західний напрямок нахилу та величиною 0,15 мрад і блок №2 південно-східний напрямок нахилу та величиною 0,05 мрад), які утворюють прогин території західного флангу рудника №2, а також обчислені величини осідань досліджуваної поверхні. Одержані результати збігаються з даними опрацювання супутникових радарних вимірювань.
3. Розроблена методика визначення місць ймовірних підземних обвалів за результатами нахиломірних спостережень.
4. За час проведення досліджень зафіксовано цілий ряд підземних обвалів 75% яких, розташовані поблизу зон деформацій земної поверхні, що визначені за даними опрацювання супутникових радарних вимірювань.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене науково-практичне завдання підвищення точності та достовірності результатів моніторингових досліджень вертикальних зміщень техногенно-навантажених територій геодезичними та геотехнічними методами для врахування впливу геодинамічних процесів, які відбуваються на цих територіях. В руслі даного напрямку отримано наступні результати:

1. Проведено класифікацію геодезичних методів моніторингу вертикальних зміщень техногенно-навантажених територій з врахуванням геодинамічних процесів різного характеру впливу. На основі критичного аналізу доведено ефективність використання комплексу геодезичних та геотехнічних методів для моніторингу на локальних геодинамічних полігонах.

2. Розроблена методика опрацювання ГНСС – вимірів на кінематичних геодезичних мережах з врахуванням коефіцієнтів кінематики геодезичних пунктів та практично її апробовано на мережі Канівської ГЕС, що дозволяє ефективно вирішувати задачі геодезичного моніторингу з врахуванням впливу геодинамічних явищ на досліджувану територію, без використання дороговартісного програмного забезпечення Bernese.

3. На прикладі опорної висотної мережі Рівненської АЕС досліджена кінематика реперів (визначені величини вертикальних зміщень, довжина періоду та розмах коливань), на основі чого проведено групування реперів за кінематичними характеристиками та здійснено районування території об'єкту на три блоки за спільними швидкостями та напрямками руху земної кори.

4. Запропонована методика визначення нахилів поверхні в межах жорсткої моделі за результатами нахиломірних вимірів інклінометрами, яка може бути використана для районування техногенно-навантажених територій за кінематичними характеристиками та проведена її апробація на території шахтних полів рудника №2 Стебницького калійного родовища. За одержаними даними проведено поділ території на два блоки з різним напрямком нахилу та його величиною, які утворюють прогин території шахтного поля рудника №2.

5. Розроблена методика визначення місць імовірних підземних обвалів за результатами нахиломірних спостережень, яка практично апробована під час моніторингу території рудника №2 Стебницького калійного родовища. Місця розташування підземних обвалів у 75%, розташовані поблизу зон деформацій земної поверхні, які визначені за даними опрацювання супутникових радарних вимірювань.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрианова С. В. Высокоточный геодезический мониторинг при строительстве и эксплуатации современных зданий /С. В. Андрианова. – Основания, фундаменты и механика грунтов. –2008. – №2. – С.23-27.
2. Афонин Д. А. Контроль стабильности пунктов плановой геодезической сети при геодезическом контроле деформаций инженерных сооружений /Д. А. Афонин. – Геодезия и картография. – 2013. – №5. – С. 6 – 11.
3. Ашраф, А. Бешр. Разработка и совершенствование технологи определения деформации инженерных сооружений с помощью современных высокоточных геодезических способов и средств изменений: дис. ... канд.техн. наук: 25.00.32 /Ашраф Абдель Ванис Абдель Мавла Бешр; [Место защиты: Сиб. гос. геодез. акад.]. – Новосибирск –2010 – 205 с.
4. Баран П. І. Інженерна геодезія / П. І.Баран. – Київ: Видавництво ВІПОЛ – 2012. –618 с.
5. Баран П. І. Геодезичні спостереження за деформаціями об'єкта "Укриття" на Чорнобильській АЕС / П. І. Баран, В. Г. Сушко, О. В. Холодюк, В. Я. Чорнокінь// Вісник геодезії та картографії. – 1999. - № 1. - С. 18-23.
6. Бархударян А. М. Применение метода гидродинамического нивелирования при монтажных работах /А. М. Бархударян, А. Г. Бегларян, П. В. Амбарцумян// Геодезия и картография. – 1983. –№ 9. – С.17–19.
7. Богомолова Н. Н. Геодезический мониторинг транспортных тоннелей, сооружаемых горным способом: дис. канд. техн. наук : 25.00.32 / Богомолова Наталья Николаевна; [Место защиты: Петербургский государственный университет путей сообщения].– Санкт-Петербург, 2014.– 164 с.
8. Бойко Е. Г. Методы совместной обработки локальных наземных и спутниковых геодезических сетей /Е. Г.Бойко, В. М.Зимин, М. Г. Годжаманов// Геодезия и картография. – 2000. – № 11. – С.11–18.

9. Брайт, П. И. Геодезические методы измерения деформаций оснований и сооружений / П.И. Брайт.– М.: Недра –1965.– 116 с.
10. Бурак К. О. Використання методу електронного мікронівелювання при оцінці експлуатаційної надійності технологічного обладнання реакторних відділень АЕС /К. О. Буряк //Вісник геодезії і картографії.-2002.–№1(24).– С.17–20.
11. Бурштинська Х. Використання даних лазерного сканування для побудови цифрових моделей рельєфу гідрографічних мереж гірських систем /Х. Бурштинська, А. Бабушка, І. Василюха, С. Пікулик// Геодезія картографія і аерофотознімання. – 2009. – № 71. – С. 146–151.
12. Васютинский, И. Ю. Гидронивелирование /И.Ю. Васютинский – М.: Недра – 1983. – 179 с.
13. Вершинина Ю. В. Геодезическое обеспечение мониторинговых наблюдений за деформационными процессами на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений: дис. канд.техн.наук : 25.00.32 / Вершинина Юлия Васильевна; [Место защиты: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет]. – Санкт-Петербург, 2016.– 134 с.
14. Вершинина, Ю. В. Основные проблемы исследования кинематических характеристик геомеханических процессов геодезическими наземными и космическими методами /В. И. Волков, Ю. В. Вершинина// Тезисы докладов Всероссийской науч.-технич. конф. с международным участием «Геомеханика в горном деле». –Екатеринбург: ИГД УРО РАН, 2013. – С.232–233.
15. Войтенко С. Визначення кренів інженерних споруд методом наземного лазерного сканування / С. Войтенко, Р. Шульц, М. Білоус //Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва –№ I (17). – Л. –2009. – С. 144–150
16. Волков В. И. К вопросу об исследованиях кинематики приповерхностных слоев земной коры /В. И. Волков, Ю. В. Вершинина// Инженерно-

- экологические системы: материалы междунар. научн.-практич. конф. (СПб, 10-12 октября 2012 г.).– СПб. – 2012. – С. 194–198.
17. Гайдин А. М. Влияние техногенной деятельности на соляной карст /А. М. Гайдин// Екологія і природокористування. — 2008. — Вип. 11. — С. 42-54.
 18. Ганьшин В. Н. Геодезические методы измерения вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов /В. Н. Ганьшин, А. Ф. Стороженко, Н. А. Буденков и др.– 2-е изд.(перераб. и доп.)– М.: Недра – 1991. – 190с.
 19. Генике А. А. Комплексные исследования на локальных геодинамических полигонах /А. А. Генике, В. Н. Черненко// Геопрофи. – 2003. – № 2. – С. 11–15.
 20. Генике А. А., Ву Ван Донг. Особенности создания локальных геодинамических сетей спутниковыми методами. Международная научно-техническая конференция, посвященная 225-летию МИИГАиК, - М. 2004.
 21. Геодезические методы изучения деформаций земной коры на геодинамических полигонах. Методическое руководство. – М., ЦНИИГАиК, 1985
 22. Грязнев Д. Ю. Аэровизуальный мониторинг технического состояния магистрального нефтепровода, подверженного воздействию экзогенных геологических процессов [Текст] /Д.Ю. Грязнев// Безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 8. – С. 47-50.
 23. Губин В. Н. Спутниковые технологии в геодинамике /В. Н. Губин [и др.]; под ред. В. Н. Губина. – Минск: Минсктиппроект, 2010. 87 с.
 24. Гуляев Ю. П. Методика выявления по геодезическим данным степени аварийности высотных зданий и направление повышения эффективности оценки их состояния /Ю. П. Гуляев, В. С. Хорошилов, Ю. В. Родионова// Сб. матер. науч. конгр. ГЕО-Сибирь-2011, 19-29 апр., т.1 ч.1. Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия.– Новосибирск: СГГА.– 2011.– С.66-71.

25. Гуляев Ю. П. Прогнозирование деформации сооружений на основе результатов геодезических наблюдений: монография /Ю. П. Гуляев. – Новосибирск: СГГА, 2008. – 256 с.
26. Дейнека Ю. Геодезичний моніторинг горизонтальних зміщень перекриття водозливної греблі Добротвірської ТЕС / Ю.Дейнека, С. Петров// Геодезія, картографія та аерофотознімання : міжвідом. наук.-техн. зб. / М-во освіти і науки України, Нац. ун-т "Львів. політехніка". Львів, 2007. Вип. 69. С. 105–109.
27. Дейнека Ю. Досвід виконання геодезичного контролю за технічним станом об'єктів паливно-енергетичного комплексу /Ю. Дейнека, Р. Озімбловський, С. Петров//Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва–№ I (27). – Л.–2014. – С. 59–61
28. Джуман Б. М. Метод определения нивелирной рефракции /Б. М.Джуман, П. В.Павлив, И. И.Стащишин//Геодезия, картография и аэрофотосъемка. – 1979. – Вып. 30. – С.66–69.
29. Дмитриев П. Н., Голубев В. И., Исаев Ю. С., Киселева Е. А., Михайлов В. О., Смольянинова Е. И. Некоторые проблемы обработки и интерпретации данных спутниковой радарной интерферометрии на примере мониторинга оползневых процессов. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 2012. т.9, №2, с. 130-142.
30. Доброхотов Ю. С. Высокочувствительные уровни и измерения наклонов / Ю. С. Доброхотов. — Москва. 1988. — 108 с.
31. Дослідження та розробки в галузі геодезії і розробки корисних копалин (спостереження за осіданнями будівель і споруд енергоблоків № 1,2 та контроль висотної мережі ВП «РАЕС): Звіт про НДР (заключний) /НУ «Львівська політехніка» ; кер. Третяк К. Р ; виконав. Бохонко С. І. [та ін.]. - Львів 2013. – 142 с.
32. Дутчин М. Дослідження осідань поверхні ґрунту і реперів під впливом статичних навантажень фундаментів споруд /М. Дутчин, Т. Грицюк//

- Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва –№ II (26). – Л. – 2013. – С.72–75
33. Жуков Б. Н., Карпик А. П. Геодезический контроль инженерных объектов промышленных предприятий и гражданских комплексов /Б. Н. Жуков, А. П. Карпик// Новосибирск: СГГА. – 2003. – 356 с.
 34. Зайцев А. К. Геодезические методы исследования деформаций сооружений /А. К. Зайцев, С. В. Марфенко, Д. Ш. Михелев. –М.: Недра. – 1991. –272 с.
 35. Захаров А. И. Применение РСА-интерферометрии для мониторинга транспортной инфраструктуры в зонах с опасной динамикой покровов / А. И. Захаров, Л. Н. Захарова, М. А. Лебедева// Журнал радиоэлектроники. – № 10.–2010. – С. 32–38.
 36. Заяць О. С. Високоточні нахиломірні вимірювання для моніторингу території шахтних полів рудника №2 Стебницького калійного родовища /Заяць О. С., Наводич М. Б., Петров С. Л., Третьяк К. Р. // Науковий журнал “Геодинаміка” – Л. –2017.–№2 (23) – С.25–33.
 37. Зверев А. Т. Проблемы эволюции формы геоида// Изв. вузов. «Геод. и аэроф.». 1988. 3. – С. 44–47.
 38. Зубарев А. Э. Современные проблемы обеспечения территорий высокоточными значениями высот /А. Э. Зубарев, С. В. Лебедев, И. Е. Надеждина, Ю. Е. Федосеев// Геопрофи. –2012. – № 3. – С. 54–57.
 39. Зубов А. В. Прикладная геодезия. Наблюдение за осадками и деформациями инженерных сооружений /Сост.: А. В. Зубов, Т. В. Зубова, Ю. Х. Гилевский. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). – 2009. – 36 с.
 40. Идентификация движений и напряженно-деформированного состояния самоорганизующихся геодинамических систем по комплексным геодезическим и геофизическим наблюдениям: монография /В. А. Середович и др.– Новосибирск: СГГА, 2004. – 356 с.

41. Иордан В. Руководство по высшей геодезии. Т.П. Прецизионное и тригонометрическое нивелирование / В. Иордан, О. Эггерт, М. Кнейсель.– М.:Госгеолтехиздат. – 1963.–263 с.
42. Іванов Є. Сучасний стан та інтенсивність розвитку процесів просідання і підтоплення в межах Червоноградського гірничопромислового району/Є. Іванов, М. Кобелька// Вісн. Львів. ун-ту. Сер. геогр. – 2006. – Вип. 33. – С. 112–121.
43. Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів за даними моніторингу ЕГП – Київ; Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2017. – 35 іл. – 100 с.
44. Кабалин Е. В. Принципы ведения постоянного мониторинга на геодинамических объектах /Е. В. Кабалин, В. С. Лохов // Геопрофи. –2012. – №2. – С. 58–61.
45. Калинченко И. С. Разработка технологических решений и исследования по оптимизации методики геодезического мониторинга геотехнических систем Заполярья : дис. ...канд.техн. наук: 25.00.32 / И. С. Калинченко [Место защиты: ФГБОУ ВПО «ОмГАУ им. П. А. Столыпина»] – Ом. – 2014. –166 с.
46. Карлсон А. А. Руководство по натурным наблюдениям за деформациями гидротехнических сооружений и их оснований геодезическими методами / А. А. Карлсон.– М.: Энергия. – 1980.– 200 с.
47. Кафтан В. И., Серебрякова Л. И. Современные движения земной коры. Т. 28.– М., 1990.–149 с. (Геодезия и аэросъемка. Итоги науки и техники. ВИНТИ АН СССР).
48. Клим С. А. Оцінка та підвищення точності геометричного нівелювання /С. А.Клим, В. М.Новосад, П. Г. Черняга// Вісник РДТУ. – 2000. – № 2 (4). –С. 257–267.

49. Книжников, Ю. Ф. Аэрокосмические методы географических исследований : учеб. для студ. учр. высш. проф. обр. [Текст] /Ю. Ф. Книжников, В. И. Кравцова, О. В. Тутубалина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд. центр «Академия», 2011. – 416 с.
50. Ковшов Г. Н. Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении./Г. Н. Ковшов, Г. Ю. Коловертнов – Екатеринбург: Изд. УГНТУ. – 2001.– 227 с.
51. Колмогоров В. Г. Современная геодинамика Сибири по результатам геодезических и геолого-геофизических исследований: монография. – Новосибирск : СГГА, 2013. – 236 с
52. Кузнецов О. Ф. Инженерная геодезия / О. Ф. Кузнецов– М: МГСУ. – 2010– 363с.
53. Кузьмин Ю. О., Жуков В. С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород – 2-е изд., стер. — М.: Горная книга, 2012. — 264 с.
54. Лехнер И. Автоматизированная гидростатическая система на объектах атомной электростанции Темелин/И. Лехнер, К. Радей// Интерэкспо ГЕО – Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр., 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. Т. 1. – Новосибирск : СГГА. – 2012. – С. 148 – 156.
55. Літинський В. О. Особливості застосування двостороннього тригонометричного нівелювання/В. О. Літинський, С. С. Перій, В. О. Сухоруков// Вісник геодезії та картографії. – 2013. – № 1 – С 10–13.
56. Лысков И. А. Мониторинг деформационных процессов земной поверхности методами радарной интерферометрии. /И. А. Лысков, В. В. Мусихин, Ю. А. Кашников// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2010, №5, С. 11–16.

57. Мазуров Б. Т. Математическое моделирование по геодезическим данным: учеб. пособие. – Новосибирск: СГГА, 2013. –127 с.
58. Мазуров Б. Т. Геодинамика и геодезические методы ее изучения [Текст] : учеб. Пособие / Б.Т. Мазуров , И.Е. Дорогова. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 175 с
59. Марущак М. П. Способи тригонометричного нівелювання електронним тахеометром /М. П. Марущак//Вісник геодезії та картографії. – 2010. – № 1 – С. 11–14.
60. Марфенко С. В. Геодезические работы по наблюдению за деформациями сооружений: Учебное пособие./ С.В. Марфенко – М.: Изд-во МГУГиК. – 2004. –35с.
61. Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений МДС 13-22.2009.– М. – 2010. –71 с.
62. Михайлов В. О. Оценка полного вектора смещений земной поверхности и техногенных объектов по данным радарной спутниковой интерферометрии для областей разработки месторождений нефти и газа /В. О. Михайлов, Е. А. Киселева, П. Н. Дмитриев, В. И. Голубев, Е. И. Смольянинова, Е. П. Тимошкина// Геофизические исследования. 2012. № 3. С. 5 – 17
63. Михалев Д. Ш. Геодезические измерения при изучении деформаций крупных инженерных сооружений /Д. Ш. Михалев, И. В. Рунов, А. И. Голубцов – М.: Недра. – 1977. – 151 с.
64. Мовсисян Р. А. Новые приборы и методы для автоматизации измерений осадок сооружений /Р. А.Мовсисян, И. А. Таплашвили// «Пробл. Астрон. и геод. Тр. 6-го Съезда Всес. Астрон.-геод. о-ва, Ереван. – 1975. Геод.». – М. – 1979. – С. 88 – 89
65. Мовсисян, Р. А. Теоретические основы метода гидродинамического нивелирования /Р. А. Мовсисян, А. М. Бархударян// Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. –1976. – №1. – С. 10–14.

66. Могильный С. Совместная обработка наземных и спутниковых геодезических измерений в локальных сетях /С. Могильный, А. Шоломицкий// Геодезія і геодинаміка. – 2009. – № 17. – С.122–131.
67. Мордвінов І. С. Моніторинг вертикальних зміщень території ГХП «Полімінерал» з використанням інтерферометричних методів обробки супутникових радарних вимірювань та нахиломірних спостережень /І. С. Мордвінов, М. Ю. Пакшин, І. І Ляска., О. С.З аяць, С. Л. Петров, К. Р. Третяк // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – випуск І (35) . – Л. – 2018. – С.70–75
68. Мурзайкин, И. Я. Контроль стабильности планово-высотной опорной сети /И. Я. Мурзайкин, В. И. Мурзайкин// Геодезия и картография. – 2009. – № 9. – С. 15–18
69. Назаревич А. В. Відображення локального, регіонального та глобального сейсмотектонічного процесу у деформаціях порід активних тектонічних структур і прогноз землетрусів /А.В.Назаревич// Геодинаміка. – 2013. – № 12(15). – С. 244–246.
70. Наземное лазерное сканирование. Введение в технологию. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gsi.ru/catalog.php?id=1>
71. Николаев, С. А. Статистические исследования осадок инженерных сооружений / С.А. Николаев. – М. : Недра. – 1983. – 112 с.
72. Остач О. М. Геодезические методы изучения деформаций земной коры на геодинамических полигонах. /О. М. Остач, В. Н. Дмитроченков, В. В. Злотин–М.: ЦНИИГАиК, 1985. –113 с.
73. Островский А. Л. Учет атмосферных влияний на астрономо-геодезические измерения/А. Л. Островский, Б. М. Джуман, Ф. Д. Заблоцкий, Н. И. Кравцов. – М.: Недра. – 1990. – 235с.
74. Островський А. Л. Деякі питання створення геодинамічних техногенних полігонів і наукових досліджень на них /А. Л. Островський, П. О. Романишин, П. П. Шпаківський// Вісник геодезії та картографії. – 1996. – № 1 (5). – С. 16–24.

75. Островський А. Л., Черняга П. Г. Розрахунок очікуваної точності геометричного нівелювання та проектування програми робіт на геодинамічних полігонах /А. Л. Островський, П. Г.Черняга// Геодезія, картографія та аерофотознімання. – 2001. – № 61. – С. 101–107.
76. Павлив П. В. Проблемы высокоточного нивелирования /Павлив П.В. – Львов: Вища школа, Изд-во при Львов. ун-те. – 1980. – 124 с.
77. Панжин А. А., Об особенностях проведения геодинамического мониторинга при разработке месторождений полезных ископаемых Урала с использованием комплексов спутниковой геодезии /А. А. Панжин, Н. А. Панжина// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (ФТПРПИ). 2012. № 6. С. 46–55.
78. Перій С. С. До визначення вертикальної рефракції за коливаннями зображень./С.С. Перій// Зб. наук. пр. "Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва в Україні": Вид. Львівським астрономо-геодезичним товариством, ДУ "Львівська політехніка".– Львів. – 1997. – С. 91–94.
79. Перій С. С. До визначення вертикальної рефракції при геометричному нівелюванні / С. С.Перій// Зб.наук. пр. Західн. Геодезичн. Тов. УТГК. Вид-во. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – Львів. –2006. –Вип. І(11). – С.146–150.
80. Петров С. Л. Сумісне опрацювання результатів високоточного геометричного нівелювання та нахиломірних вимірів /С. Л. Петров// Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – випуск І (29) . – Л. – 2015. – С.70–75
81. Пигин А. П. К реализации совместной обработки спутниковых и наземных измерений локальных сетей в системе CREDO_DAT /А. П. Пигин, Д. В. Чадович// Автоматизированные технологии изысканий и проектирования – 2003.–№8.–С 63–64.
82. Прилепин М. Т Спутниковые методы /М.Т Прилепин// Современная динамика литосферы континентов. Методы изучения.– М.: Наука – 1989. – 100–111.

83. Прилепин М. Т. Концепция использования глобальных спутниковых систем для прогноза землетрясений. Электронный журнал "Вестник ОГГГТН РАН". – №1(3) 98.
84. Романишин І. Класифікація та основні характеристики наземних 3D-сканерів /І. Романишин, А. Маліцький, В. Лозинський// Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2012. – Вип. II(24). – С. 69–74.
85. Рудько Г. І. Техногенно – экологическая безопасность горнопромышленных комплексов серной промышленности Прикарпатья на стадии ликвидации /Рудько Г. І., Шкица Л. Є.// Разработка рудных месторождений. – 2002. – №79. – С.136–140.
86. Руководящий технический материал по изучению деформаций земной поверхности геодезическими методами на полигонах атомных электростанций. ГКИНП-10-186-84. Утвержден ГУГК 30.11.84. - М., ЦНИИГАиК, 1984
87. Руководящий технический материал по проведению геодезических работ при изучении влияния техногенных процессов на деформацию земной поверхности. Утвержден ГУГК 03.04.78. – М., ОНТИ ЦНИИГАиК, 1978
88. Руководящий технический материал по форме оперативной публикации результатов измерений и анализа деформаций земной поверхности на геодинамических полигонах. ГКИНП-10-207-87. Утвержден ГУГК 27.08.87
89. Сергеев Д. О. Использование результатов аэровизуального обследования при оценке опасности экзогенных геологических процессов на трассе магистрального нефтепровода [Эл. ресурс] /Д. О. Сергеев, Г. З. Перльштейн, А. Н. Хименков, Ю. В. Халилова, А. Н. Угаров// ЭНЖ «Нефтегазовое дело» / УГНТУ. – Уфа, 2011. – № 6. – С. 101–115. – Режим доступа: http://www.ogbus.ru/authors/SergeevDO/SergeevDO_1.pdf; дата обр. 03.05.2015.
90. Сидоров В. А. Современные движения земной коры осадочных бассейнов. /В. А.Сидоров, Ю. О. Кузьмин– М.: Наука, 1989. –182 с.

91. Сідоров І. С. Сумісне опрацювання супутникових і наземних геодезичних вимірів високочастотної мережі будівництва Дністровської ГАЕС /І. С. Сідоров, К. Р. Третяк// Вісник геодезії та картографії. – 2012. – № 3 (78). – С. 6–9.
92. СОУ-Н МЕВ 40.1-00013741-79:2012 Настанова з проведення спостережень за осіданням фундаментів, деформаціями конструкцій будівель і споруд та режимом підземних вод на майданчиках теплових та атомних електростанцій. – Київ : Міністерство енергетики та вугільної промисловості України –2013 – 79 с.
93. Стурман В. И. Закономерности пространственно-временного распределения показателей аварийности промышленных трубопроводов на нефтяных месторождениях Удмуртской Республики/Стурман В. И., Федорова К. С.//Природные опасности: связь науки и практики : материалы II Междунар. Науч.-практ. Конф., Саранск 23 – 25 апреля 2015 г. – Саранск: Из-во Мордов. уни-та, 2015. — С. 415-420.
94. Сучасна геодинаміка та геофізичні поля Карпат і суміжних територій: монографія /К. Р. Третяк, В. Ю. Максимчук, Р. І. Кутас та ін. ; за заг. ред. К. Р. Третяка, В. Ю. Максимчука, Р. І. Кутаса ; М-во освіти і науки України, НАН України, Нац. ун-т "Львів. політехніка", Карпат. від-ня Ін-ту геофізики ім. С. І. Субботіна. – Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2015. – 420 с.
95. Толстов Е. Г. Оперативный контроль исходной разбивочной сети (на примере строительства второй сцены Мариинского театра) /Е. Г. Толстов, Д. В. Крашеницин// Современные проблемы инженерной геодезии. Труды международной научно-практической конференции. – СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – 2010. – С.190–194.
96. Третяк К. Р. Аналіз результатів моніторингу острівних льодовиків Антарктичного узбережжя лазерним скануванням та цифровим стереофотограмметричним методом /К. Р. Третяк, В. М. Глозов, Ю. І.

- Голубінка //Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва,– Л.– 2013. – випуск II (26) . – С. 130–136.
97. Третяк К. Р. Оптимізація кінематичних геодезичних мереж: дис... д-ра техн. наук: 05.24.01 / Третяк Корнилій Романович; Національний ун-т "Львівська політехніка". – Л. –2004. –341 с.
98. Третяк К. Р. Аналіз стійкості пунктів системи автоматизованого геодезичного моніторингу інженерних споруд Канівської ГЕС /К. Р. Третяк, С. Л. Петров, Ю. І. Голубінка, Ф. К. Ф. Аль-Алусі//Геодезія, картографія та аерофотознімання, Л.: вид-во Львівської політехніки. – 2015.– вип.80. – С. 5 – 19.
99. Третяк К. Р. Дослідження періодичних змін висотного положення супутникових перманентних станцій світу/К Р. Третяк, О. М. Смірнова, Т. М. Бределева// Науковий журнал “Геодинаміка” –Л. –2012.–№1 (12)– С.11–29.
100. Третяк К. Р. Новий метод визначення впливу випадкових та систематичних похибок на точність висотних мереж (на прикладі державної нівелірної мережі 1-го класу України) /К.Р.Третяк// Геодезія картографія і аерофотознімання. – 2000. – № 60. – С. 66–74.
101. Третяк К. Р. Теоретичне обґрунтування методики обробки висотних кінематичних мереж. /К. Р.Третяк// Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: Ліга-Прес. – 2002. – С. 100–110.
102. Уставич Г. А. Разработка многоуровневой двойной гидродинамической системы. /Г. А. Уставич, А. М.Олейник, Е. Л.Шалыгина// Изв.вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2004. –№ 1. – С. 40–53.
103. Уставич, Г. А. Геодезические работы при строительстве и эксплуатации крупных энергетических объектов /Г. А. Уставич, Г. Д. Костина. – М.: Недра. – 1983. –130 с.
104. Флерко С. Н. Методика построения системы непрерывного геодинамического мониторинга гидротехнических сооружений на основе

- ГНСС технологий /С. Н. Флерко//Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил, 2009, випуск 2(20) с. 59 – 64
105. Фрейман Э. В. Особенности построения алгоритмов ориентации гироскопических инклинометров на базе одноосного гиросtabilизатора/Э.В. Фрейман, С.В. Кривошеев, В.В. Лосев// – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор». – 2002.– С. 168 – 178.
106. Хиллер Б. Автоматизированный деформационный мониторинг – инновационные технологии на службу обеспечения безопасности в горнодобывающей, нефтяной и газовой промышленности /Б. Хиллер// Маркшейдерский вестник. –2010. – № 4 –С 54 – 58.
107. Хомоненко А. Д. Информационная система геодезического мониторинга деформаций транспортных сооружений /А. Д. Хомоненко, М. Я. Брань, А. А. Никитчин// Наука и транспорт: Модернизация железнодорожного транспорта.–2013. – № 2 (6).– С 58-60.
108. Черняга П. Г. Розрахунок точності геометричного нівелювання на геодинамічних полігонах /П. Г. Черняга, О. Є. Янчук, Г. С. Ішутіна//Науковий журнал “Геодинаміка”– Львів. –2010. – №1 (9). – С.10–21.
109. Черняга П. Г. Вибір методів побудови мереж для геодезичного моніторингу на геодинамічних полігонах атомних електричних станцій /П.Г. Черняга// Інженерна геодезія. – К.: КНУБА. –1998. – № 40. – С. 220–223.
110. Черняга П. Г. Розрахунок оптимальних частот та тривалості циклів повторних вимірювань на ГДП АЕС /П.Г.Черняга// Інженерна геодезія. – 1998. – № 40. – С. 215–219.
111. Шароглазова Г. А. Применение геодезических методов в геодинамике: учеб. пособие. – Новополюцк: ПГУ, 2002. – 192 с.
112. Шеховцов Г. А. Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений: монография; /Г. А. Шеховцов, Р. П.

- Шеховцова . – Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т – Н.Новгород: ННГАСУ. – 2009. –156с.
113. Янчук О. Є. Геодезичний моніторинг техногенно-навантажених територій: дис. ...канд. техн. наук : 05.24.01 /Янчук Олександр Євгенович ; [Місце захисту: Національний університет «Львівська політехніка»].– Львів, 2011.– 173 с.
114. Ященко А. И. Области применения цифровых инклинометров/А. И. Ященко//Геопрофи. –2010.–№ 5.–С. 57–59.
115. Acton J. M. Why Fukushima Was Preventable; Carnegie Endowment for International Peace/ Acton J. M., Hibbs M. //Washington, D.C. – 43p.
116. Aksamitauskas V.Č. “Investigation of error sources measuring deformations of engineering structures by geodetic methods” in 10th International modern building materials, structures and techniques./V. Č.Aksamitauskas, D. Rekus, A. Wasilewski// May 19–21, 2010, Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika. – 1071–1076 pp.
117. Alojz Kopáček Automated monitoring of the Danube bridge Apollo in Bratislava/Alojz Kopáček, Peter Kyrinovic, Imrich Lipták and Ján Erdélyi// FIG Working Week 2011 Bridging the Gap between Cultures Marrakech, Morocco. – 18–22 May 2011. – 11 p.
118. Álvarez-Vigil, A. E. Forensic analysis of the evolution of damages to buildings constructed in a mining area./Álvarez-Vigil, A. E., González-Nicieza, C., López Gayarre, F. & Álvarez-Fernández, M.I./ Engineering Failure Analysis. – 17 (4). – June 2010. – pp. 938-960.
119. Arnoso, J. The 2011 volcanic crisis at El Hierro (Canary Islands): monitoring ground deformation through tiltmeter and gravimetric observations./ Arnoso, J., Montesinos, F. G., Benavent, M. & Vélez, E. J.// EGU General Assembly 2012, held 22-27 April, 2012 in Vienna, Austria. – p. 53–73.
120. Barbot Sylvain, Hamiel Yariv, Fialko Yuri. Space geodetic investigation of the coseismic and postseismic deformation due to the 2003 Mw7.2 Altai

- earthquake: Implications for the local lithospheric rheology. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, B03403, doi:10.1029/2007JB005063, 2008.
121. Beavan R. J., Litchfield N. J. (2012). Vertical land movement around the New Zealand coastline: implications for sea-level rise. *GNS Science Report 2012/29*. 41 p
122. Bihter Erol Evaluation of High-Precision Sensors in Structural Monitoring /Bihter Erol//Sensors. –2010. –10. –pp. 10803–10827; doi:10.3390/s101210803.
123. Bosy J., Kontny B. (1998) Strategy of GPS data processing in local geodynamical networks, *Reports on Geodesy No. 9(39)*, 1998. Warsaw University of Technology, Institute of Geodesy and Geodetic Astronomy. pp. 105-113.
124. Branko Glisic Whole Lifespan Monitoring Of Concrete Bridges / Branko Glisic, Daniele Inaudi and Samuel Vurpillot // First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management Barcelona, 14 – 17 July. – 2002. – 8 p.
125. Caccamise D. J., Merrifield M. A., Bevis M., Foster J., Firing Y. L., Schenewerk M. S., Taylor F. W. and Thomas D. A. (2005). Sea level rise at Honolulu and Hilo, Hawaii: GPS estimates of differential land motion, *Geophysical Research Letters*, 32(3), L03607. DOI:10.1029/2004GL021380.
126. Çakir Ziyadin, Jean-Bernard de Chabaliér, Rolando Armijo, Bertrand Meyer, Aykut Barka, Gilles Peltzer. Coseismic and early post-seismic slip associated with the 1999 Izmit earthquake (Turkey), from SAR interferometry and tectonic field observations. *Geophysical Journal International*. 2003, DOI: 10.1046/j.1365-246X.2003.02001.x.
127. Cheng LI, Use of Mems Accelerometers/Inclinometers as a Geotechnical Monitoring Method for Ground Subsidence /Cheng LI, Tomas M. Fernandez-Steeger, J6 Ágila Bitsch Link, Matthias MAY and Rafiq Azzam // *Acta Geodyn. Geomater.* – 2014 – Vol. 11 – No. 4 (176) – 337–349: DOI: 10.13168/AGG.2014.0015

128. Colesanti, C. Investigating landslides with space-borne synthetic aperture radar (SAR) interferometry /C. Colesanti, J. Wasowski // Engineering Geology. – 2006. – No. 88. – P. 173–199.
129. Ehigiator I. Modification of Geodetic Methods for Determining the Monitoring Station Coordinates on the Surface of Cylindrical Oil Storage Tank / Ashraf A. Beshr, Ehiorobo J.O. and Ehigiator O.M. // Research Journal of Engineering and Applied Sciences (RJEAS) 1 (1). –2012. – pp. 58 - 63. A United State Academy publications USA DOI:10.4028/ AMR.367.475.
130. Farina Paolo, Moretti Sandro, Colombo Davide, Fumagalli Alfio, Manunta Paolo. Landslide risk analysis by means of remote sensing techniques: results from the ESA/SLAM project. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS'04. Proceedings. 2004. IEEE International.
131. Farina, P. Radar-interpretation of InSAR measurements for landslide investigations in civil protection practices /P. Farina, N. Casgli, A. Ferretti // Landslides and society. AEG special publication. – 2007. – P. 272–283.
132. Fomelis M., Is. Parcharidis, E. Lagios, N. Voulgaris. Evolution of post-seismic ground deformation of the Athens 1999 earthquake observed by SAR interferometry. Journal of Applied Geophysics, 2009, DOI: 10.1016/j.jappgeo.2009.02.007.
133. Fundamental bending mode and vibration monitoring with inclinometer and accelerometer on high-rise buildings subject to wind loads [Электронный ресурс] / [X. Li, C. Rizos, Y. Tamura та ін.] – Режим доступу до ресурсу: http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/lix_etal2010a.pdf.
134. Geodetic Deformation Analysis with Respect to Observation Imprecision Shaping the Change/Ingo Neumann, Hansjörg Kutterer// XXIII FIG Congress Munich, Germany, October 8. –2006. – pp.. 13 – 14.
135. Gorres B. Bestimmung von Höhenänderungen in regionalen Netzen mit dem Global Positioning System.-Dtsch. Geod. Kommiss. Bayer Akad. Wiss Veroeff.-C.№461.1996.

136. Henrique M. Measuring Inclinations in Cabril Dam with an Optoelectronic Sensor / M. Henrique, J. Lima, S. Oliveira. // FIG Working Week 2012. Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage. Rome, Italy, 6-10 May. – 2012.
137. How hybrid GPS-based surveying techniques can further assist with structural design and construction [Електронний ресурс] / [X. Li, A. Yoshida, Y. Tamura та ін.] – Режим доступу до ресурсу: http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/lix_etal2008a.pdf.
138. Ireneusz Wyczalek The usage of posital canopen ags 15 inclinometers for diagnostic monitoring of slender structures/Ireneusz Wyczalek, Artur Plichta, Michał Wyczalek// Reports on Geodesy and Geoinformatics– 2013. –vol. 95. – pp. 11-22. DOI: 10.2478/rgg–2013-0009.
139. Jaroslav Braun, Geodetic Monitoring Methods of Landslide-Prone Regions – Application to Rabenov /Jaroslav Braun, Pavel Hánek // AUC Geographica, 2014–Vol49– No.1– pp. 5–19.
140. João C. The Geodetic Surveying Methods in the Monitoring of Large Dams in Portugal /C. João, H. João.// FIG XXII International Congress. Washington D.C. USA, April 19-26. – 2002.
141. Joël van Cranenbroeck Continuous Beam Deflection Monitoring Using Precise Inclinometers/Joël van Cranenbroeck// FIG Working Week 2007 Strategic Integration of Surveying Services, Hong Kong SAR, China 13–17 May. – 2007. – 14 p.
142. Joël VAN CRANENBROECK, A New Geodetic Network Design for Hydro Power Plant/Joël VAN CRANENBROECK, Andrey BALAN and Marco DI MAURO// FIG Working Week 2012 Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage, May 6-10 – 2012. – Rome, Italy.– p. 19.
143. Van Cranenbroeck. J., Aschroft. N. (2007). Single to Multi Frequency GNSS Signal Processing Solutions for Engineering Structure Monitoring Applications. The International Global Navigation Satellites Systems Society Inc. (IGNSS)

- IGNSS2007 Symposium – The University of New South Wales, Sydney Australia.
144. Kadlečík, P., Schenk, V., Seidlová, Z. and Schenková Z., Analysis of vertical movements detected by radar interferometry in urban areas, *Acta Geodyn. Geomater.*, v. 7, No. 3(159), 2010, 371-380.
 145. Kerem Halicioglu, Digital zenith camera system for Astro-Geodetic applications in Turkey/Kerem Halicioglu, Rasim Deniz, Haluk Ozener//*Journal of Geodesy and Geoinformation* Vol.1 – Iss.2 – November 2012 – Journal No.106 –pp.115-120: DOI:10.9733/jgg.131212.1
 146. Kersting N. Kinematische Modelle zur Analyse rezenter krustenbewegungen und ihre anwendung auf die daten des testnetzes Pfungstadt/ . Kersting, W. Welsch / *Veroff. Dtsch. geod. kommis. Bayer. Akad. Wiss.* –1987.– №283.– pp. 135-166.
 147. Kornilyi Tretyak Kinematics of Reference Height Network on The Territory of Rivne NPP /K. Tretyak, S. Petrov, S. Bokhonko, L. Babiy, O. Shpakivskyy// *Reportson Geodesy and Geoinformatics.* – 2014. –vol. 96. –pp. 55-66 : DOI: 10.2478/rgg-2014-0006.
 148. Kuhn, M. 1984. Mass budget imbalances as criterion for a climatic classification of glaciers. *Geogr. Annaler*, 66A, 229-238.
 149. L. Tarasov; W. Richard Peltier Greenland glacial history and local geodynamic consequences *Geophysical Journal International*, Volume 150, Issue 1, 1 July 2002, Pages 198–229
 150. Larsen Ch. F., Echelmeyer K. A., Freymueller J. T., and Motyka R. J. Tide gauge records of uplift along the northern Pacific-North American plate boundary, 1937 to 2001. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, № B4, 2216, doi:10.1029/2001JB001685, 2003.
 151. Lehmann M., Figurski M. (2000) Local Height Variations of Selected GPS Permanent Stations, *Artificial Satellites, Journal of Planetary Geodesy*, Vol. 35, No. 1. pp. 9-23.

152. Lienhart Werner. TS30 White Paper/Werner Lienhart, Daniel Nindl, Hans-Martin Zogg, // Leica Geosystems AG.– 2009. – p.12.
153. Maria J. Henriques Measuring Inclinations in Cabril Dam with an Optoelectronic Sensor /Maria J. Henriques, José N. Lima and Sérgio B. Oliveira// FIG Working Week 2012 Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage Rome, Italy, 6-10 May. – 2012– p. 15.
154. Matthew E. Pritchard InSAR, a tool for measuring Earth’s surface deformation /E. Matthew.// Physics Today. – 2006. – P. 68–69.
155. Meisina, C. Use of permanent scatterers technique for large-scale mass movement investigation /C. Meisina, F. Zucca, F. Conconi, F. Verri, D. Fossati, M. Ceriani, J. Allievi// Quaternary International. – 2007. – P. 90–107.
156. Miller Z. Zastosowanie fotogrametrii do celow inzynierskich /Z.Miller //“Prz. bud.”. –1987.–№5. –pp. 200–203, 231–232.
157. Petrov, L., Gordon, D., Gipson, J., Macmillan, D., M. A, C., Fomalont, E., Walker, R. C., and Carabajal, C. (2009), Precise Geodesy with the Very Long Baseline Array, Journal of Geodesy, 83(9), 859–876.
158. Quanwei Liu. Time Dependent Models of Vertical Crustal Deformation from GPS – Leveling Data. /Q. Liu// American Congress on Surveying and Mapping Journal: Surveying and Land Information System Division. March. – 1998–Vol. 58. –№ 1–pp. 5 –12.
159. RohrmanR. G. Integrated monitoring of offshore wind turbines – requirements, concepts and experiences / R. G. Rohrman,Thöns, S. & Rucker, W. // Structure and Infrastructure Engineering.–2008. – 6(5). – pp. 575–591.
160. Schaefer W. Photogrammetrische Beobachtung von Bauwerksverform ungen/W. Schaefer// “Markscheidewesen”.–1985. –№4, pp. 148–151.
161. Schäfer Tanja. Überwachung von Bodenbewegungen über einem Erdgas-Popenspeicher mit Metodender satellitenbasierten Radarinterferometrie, /Schäfer Tanja Brock Tilman, Busch Wolfgang, Stark Matthias//: In: DMV und

- IMGF (Hrsg.): Tagungsband Energie und Rohstoffe 2011 - Beitrag des Markscheidewesens, 7. – 10. 09. 2011 Freiberg. – S. 230 – 239.
162. Schöne J. Fehlereinflüsse bei Messungen mit selbsthorizontierenden Nivellierinstrumenten und deren Aufhebung durch entsprechende Meseverfahren. / J. Schöne // «Vermessungstechnik». – 1962. – 10. – №8. – (PЖ. 1963, 1.52.202).
163. Schuh, H., and Behrend, D. (2012), VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry, *Journal of Geodynamics*, 61, 68–80.
164. Schwarz Willfried. Moderne Messverfahren in der Ingenieurgeodasie und ihr praktischer Einsatz /W. Schwarz //Flachenmanag. Und Bodenordn. –2002. 64. – №2. –pp. 87–97.
165. Sherman, C. S. Developing a Rock Mass Tilt And Seismic Observatory at DUSEL. / Sherman, C. S., Magliocco, M. & Glaser, S. D.,// 45th U.S. Rock Mechanics:Geomechanics Symposium, June 26-29. – 2011. –San Francisco, California.– p. 7.
166. Teferle F. N., Bingley R. M., Orliac E. J., Williams S. D. P., Woodworth P. L., McLaughlin D., Baker T. F., Shennan I., Milne G. A., Bradley S. L. and D. N. Hansen. Crustal motions in Great Britain: evidence from continuous GPS, absolute gravity and Holocene sea level data. *Geophys. J. Int.* (2009) 178, 23–46. doi: 10.1111/j.1365- 246X.2009.04185.x.
167. Thierbach H. Automatische Hohenuberwachung von Turbinenfundamenten in Groskraftwerken / H.Thierbach //“Allg. Vermess. –Nachr.”. – 1981, 88. – №2. – p. 51–58.
168. Vurpillot S. "Vertical deflection of a pre-stressed concrete bridge obtained using deformation sensors and inclinometer measurements"/ S.Vurpillot, G.Krueger, D.Benouaich, D.Clément, D.Inaudi // *ACI Structural Journal*.1998. – Vol 95. – № 5.pp. 518 –526.
169. Wan A. Monitoring high-rise building deformation using Global Positioning System [Электронный ресурс] / A. Wan, Z. Othman, H. Najib – Режим

доступу

до

ресурсы:

<http://www.gisdevelopment.net/technology/gps/techgp0024.htm>.

170. Wiesaw Grzebyk, Lech Stolecki Pomiarы inklinometryczne jako narzędzie monitoringu deformacji górotworu w kopalniach podziemnych /W. Grzebyk, L. Stolecki //Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energi Polskiej Akademii Nauk. –2014. –№ 86.–pp. 97 – 104.
171. Wirth B., Donatsch G., Geodatische Vermessung.-c. 1 16, №44. - 1998.
172. Wunderlich, Th., Optical Plumbing versus RTK-GNSS – Staking out on high Levels /Wunderlich, Th. // TS 2 – Networks and GNSS applications INGEO 2014 – 6th International Conference on Engineering Surveying, April 3-4– 2014–Prague– Czech republic. –pp.47-52

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Висоти глибинних реперів в (мм)

Дата вимірів (в долях року)	Рп1	Рп2	Рп3	Рп4	Рп5	Рп6	Рп7	Рп8	Рп9	Рп10	Рп11
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1984,250	188549,4	188785,8	189465,5	192177,5	188742,6	189628,5					
1984,500	188549,7	188785,6	189464,8	192178,4	188742,6	189628,9					
1984,667	188550,0	188786,0	189466,1	192178,4	188742,6	189629,6					
1984,917	188549,2	188786,1	189465,8	192178,8	188742,6	189629,3					
1985,250	188548,8	188786,2	189466,0	192178,9	188742,6	189629,8					
1985,417	188549,0	188785,9	189465,4	192179,0	188742,6	189629,3					
1985,750	188549,1	188785,9	189465,6	192178,5	188742,6	189629,6					
1986,000	188549,0	188786,0	189465,5	192178,3	188742,6	189629,4					
1986,333	188549,9	188785,8	189466,2	192178,4	188742,6	189629,7					
1986,583	188549,5	188786,2	189465,8	192178,3	188742,6	189629,7					
1986,750	188549,7	188786,1	189465,7	192178,6	188742,6	189629,9					
1986,917	188549,4	188786,0	189465,8	192178,5	188742,6	189630,0					
1987,250	188549,1	188785,8	189465,5	192178,1	188742,6	189629,9					
1987,500	188549,5	188786,3	189465,8	192178,1	188742,6	189630,4					
1987,750	188548,9	188786,0	189465,9	192178,9	188742,6	189630,0					
1988,417	188548,9	188786,3	189465,8	192178,6	188742,6	189630,2					
1988,833	188548,5	188785,9	189465,6	192177,9	188742,6	189629,6					
1989,167	188548,5	188786,2	189465,6	192178,1	188742,6	189630,0					
1989,750	188548,7	188786,4	189465,6	192177,0	188742,6	189629,8					
1990,167	188549,2	188786,6	189466,0	192177,4	188742,6	189630,0					
1990,333	188549,0	188786,1	189465,8	192178,0	188742,6	189629,5					
1990,667	188548,8	188786,3	189465,4	192178,3	188742,6	189629,2					
1991,167	188548,3	188786,8	189465,6	192178,4	188742,6	189630,0	189551,3				
1991,583	188549,3	188786,8	189466,0	192179,6	188742,6	189630,1	189552,0	189305,0			
1991,667	188548,7	188786,0	189465,4	192178,8	188742,6	189629,3	189551,9	189305,1			
1992,250	188548,3	188786,6	189465,7	192178,8	188742,6	189630,1	189551,9	189304,9			
1992,417	188549,3	188786,5	189465,8	192178,8	188742,6	189630,0	189552,0	189304,6			
1992,667	188548,4	188786,3	189465,1	192178,4	188742,6	189629,5	189551,6	189304,7			

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1993,167	188548,6	188786,6	189465,8	192178,9	188742,6	189630,4	189551,8	189304,6			
1993,417	188548,7	188786,5	189465,5	192178,7	188742,6	189629,8	189551,8	189303,9			
1993,667	188549,2	188786,6	189465,8	192178,7	188742,6	189629,8	189552,0	189304,2			
1993,917	188549,1	188786,4	189465,4	192178,7	188742,6	189629,7	189551,8	189304,9			
1994,167	188548,1	188787,0	189465,8	192178,8	188742,6	189629,7	189551,0	189303,7			
1994,417	188548,1	188786,3	189465,2	192178,8	188742,6	189629,3	189551,0	189303,7			
1994,667	188547,5	188786,3	189465,3	192178,9	188742,6	189629,5	189551,3	189304,0			
1995,000	188548,3	188787,3	189465,8	192179,2	188742,6	189629,8	189551,3	189303,9			
1995,167	188548,9	188786,8	189466,2	192179,1	188742,6	189630,1	189550,7	189303,6			
1995,417	188548,4	188786,8	189465,8	192179,1	188742,6	189629,9	189550,4	189303,9			
1995,750	188548,2	188786,8	189465,6	192179,0	188742,6	189628,9	189551,1	189304,0			
1995,917	188547,9	188787,0	189465,8	192178,1	188742,6	189630,0	189550,9	189304,0			
1996,250	188547,6	188787,2	189466,8	192179,6	188742,6	189631,0	189551,6	189304,3			
1996,417	188548,5	188786,8	189465,2	192178,8	188742,6	189628,9	189550,9	189303,5			
1996,833	188548,5	188786,6	189465,6	192178,0	188742,6	189629,6	189551,3	189303,5			
1997,000	188548,5	188786,8	189466,1	192178,3	188742,6	189629,8	189551,3	189303,0			
1997,250	188547,9	188787,1	189466,4	192179,0	188742,6	189630,2	189551,5	189302,9			
1997,500	188548,6	188786,9	189465,7	192178,6	188742,6	189629,8	189551,7	189302,6			
1997,667	188547,9	188787,0	189465,6	192178,5	188742,6	189630,1	189552,0	189303,2			
1997,833	188547,9	188787,1	189465,7	192178,3	188742,6	189629,6	189551,4	189302,2			
1998,167	188547,8	188787,0	189466,2	192178,7	188742,6	189630,4	189552,2	189302,9			
1998,417	188548,6	188787,0	189465,2	192177,9	188742,6	189629,5	189552,5	189303,6			
1998,667	188547,8	188786,5	189465,6	192177,9	188742,6	189629,3	189551,9	189302,5			
1998,833	188547,8	188786,7	189465,9	192177,3	188742,6	189629,7	189552,2	189302,5			
1999,167	188547,8	188787,1	189465,7	192177,3	188742,6	189629,0	189551,7	189302,2			
1999,500	188549,3	188787,7	189466,4	192178,7	188742,6	189630,2	189553,2	189303,6	188627,1		
1999,750	188548,6	188786,7	189466,2	192178,4	188742,6	189629,8	189553,1	189303,7	188627,1		
1999,958	188548,2	188787,3	189465,9	192177,7	188742,6	189630,0	189552,5	189303,2	188626,1		
2000,250	188549,8	188786,6	189466,2	192177,3	188742,6	189629,9	189552,2	189302,9	188626,6		
2000,500	188549,8	188787,3	189466,3	192178,6	188742,6	189629,9	189553,2	189304,1	188626,8		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2000,833	188549,1	188787,3	189466,5	192177,6	188742,6	189629,7	189553,0	189304,0	188628,1	192457,7	192666,5
2000,917	188548,8	188787,3	189466,4	192177,8	188742,6	189629,7	189552,5	189303,1	188626,4		
2001,250	188548,6	188787,6	189466,6	192177,7	188742,6	189630,4	189552,6	189303,1	188626,9	192458,1	192666,5
2001,417	188549,9	188787,6	189466,3	192177,8	188742,6	189630,0	189553,1	189303,4	188627,1		
2001,750	188548,5	188787,2	189466,2	192178,1	188742,6	189629,8	189551,9	189303,2	188626,5	192457,8	192666,5
2001,917	188549,1	188787,5	189466,3	192178,1	188742,6	189629,9	189552,2	189303,0	188626,7		
2002,167	188549,6	188787,7	189466,2	192178,3	188742,6	189630,3	189551,9	189302,6	188626,5		
2002,417	188548,9	188788,3	189466,6	192178,2	188742,6	189630,5	189552,5	189303,3	188626,5		
2002,667	188549,8	188787,0	189466,4	192178,9	188742,6	189629,6	189552,0	189303,3	188625,1		
2002,917	188549,0	188787,4	189465,7	192176,8	188742,6	189629,6	189551,7	189303,1	188624,9	192457,7	192666,1
2003,167	188548,8	188787,8	189466,3	192178,1	188742,6	189630,1	189551,7	189303,3	188626,5		
2003,417	188548,3	188787,2	189466,2	192178,6	188742,6	189630,0	189551,9	189303,3	188626,4		
2003,667	188550,3	188787,8	189466,3	192178,4	188742,6	189630,2	189552,7	189304,5	188627,1		
2003,917	188548,3	188787,6	189466,1	192177,7	188742,6	189630,0	189552,3	189303,8	188627,0	192457,9	192665,7
2004,167	188549,5	188787,7	189466,4	192178,4	188742,6	189630,5	189551,9	189303,1	188626,4		
2004,417	188549,5	188788,3	189466,6	192178,5	188742,6	189630,8	189552,9	189304,0	188627,7	192459,3	192667,9
2004,625	188549,9	188787,8	189466,6	192178,3	188742,6	189630,5	189552,2	189303,2	188627,1		
2004,833	188548,6	188787,6	189466,2	192178,3	188742,6	189630,0	189551,5	189302,8	188626,3	192458,3	192667,3
2005,167	188549,9	188787,7	189466,6	192178,3	188742,6	189630,6	189551,9	189302,7	188627,1		
2005,417	188549,0	188787,0	189465,6	192177,8	188742,6	189629,8	189551,6	189302,5	188626,2	192457,9	192666,4
2005,667	188548,9	188787,2	189466,3	192178,4	188742,6	189630,1	189552,1	189302,9	188626,0		
2005,917	188549,2	188787,5	189466,5	192178,0	188742,6	189630,3	189551,9	189302,9	188626,5	192457,3	192665,8
2006,167	188548,3	188787,2	189466,2	192177,6	188742,6	189629,9	189551,7	189302,4	188626,6	192457,9	192665,9
2006,417	188548,7	188787,5	189466,1	192178,0	188742,6	189629,9	189551,7	189302,2	188626,3		
2006,667	188547,7	188787,0	189466,2	192177,9	188742,6	189629,6	189552,4	189302,9	188626,3		
2006,917	188549,1	188787,1	189465,8	192177,4	188742,6	189629,9	189551,9	189302,4	188625,9	192457,7	192666,4
2007,250	188548,7	188787,3	189465,9	192177,8	188742,6	189630,2	189552,0	189302,8	188626,8	192457,3	192666,0
2007,583	188548,2	188787,6	189466,3	192178,3	188742,6	189630,3	189552,2	189303,0	188626,7		
2007,750	188549,2	188787,7	189466,3	192177,7	188742,6	189630,0	189551,9	189302,0	188625,1	192458,6	192667,0
2008,500	188549,3	188787,8	189466,8	192178,7	188742,6	189630,9	189552,7	189302,9	188626,1	192460,8	192668,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2008,667	188548,4	188787,8	189466,8	192178,8	188742,6	189630,9	189552,7	189303,2	188626,9		
2008,999	188549,1	188787,3	189465,6	192177,2	188742,6	189629,4	189551,3	189301,8	188625,8	192457,6	192666,5
2009,250	188549,5	188787,5	189466,3	192177,8	188742,6	189630,3	189552,0	189302,2	188626,7	192457,7	
2009,500	188549,6	188787,7	189466,3	192176,9	188742,6	189630,4	189552,1	189302,5	188626,6	192457,6	192666,2
2009,750	188549,8	188787,6	189466,0	192177,7	188742,6	189630,1	189551,8	189301,9	188625,4		
2009,999	188548,8	188787,5	189466,1	192177,6	188742,6	189630,0	189552,0	189302,2	188625,9	192458,2	192666,6
2010,250	188549,7	188787,5	189466,0	192178,6	188742,6	189629,8	189552,3	189302,1	188626,2	192457,8	192666,4
2010,583	188549,3	188787,7	189465,8	192177,6	188742,6	189629,8	189553,0	189302,7	188626,1	192457,9	192666,5
2010,750	188551,5	188788,0	189466,1	192178,9	188742,6	189630,3	189554,0	189304,1	188627,1		
2010,917	188549,2	188788,2	189466,7	192179,1	188742,6	189630,7	189553,4	189303,3	188626,9	192458,5	192667,1
2011,667	188549,1	188788,4	189466,4	192177,6	188742,6	189630,1	189553,5	189303,5	188627,6	192459,5	
2011,750	188550,3	188788,5	189466,3	192177,3	188742,6	189630,1	189552,1	189301,7	188625,8	192458,9	192666,5
2011,917	188548,5	188787,3	189466,7	192178,6	188742,6	189630,7	189552,9	189303,1	188627,3	192457,9	192665,9
2011,999	188549,5	188787,9	189466,7	192178,2	188742,6	189630,8	189552,8	189303,0	188627,2	192458,4	192667,0
2012,417	188549,7	188788,1	189466,7	192178,4	188742,6	189630,9	189552,6	189302,4	188627,1	192458,1	192665,6
2012,583	188548,7	188787,7	189466,8	192179,5	188742,6	189630,7	189552,6	189302,5	188626,7	192458,2	192666,2
2012,750	188548,8	188788,0	189467,3	192179,7	188742,6	189630,3	189552,7	189302,7	188626,9	192458,4	192666,5
2012,917	188549,4	188787,4	189466,5	192178,2	188742,6	189630,8	189552,8	189302,9	188626,6	192457,9	192666,3
2013,333	188549,5	188787,4	189466,5	192178,1	188742,6	189630,5	189552,9	189302,9	188626,7	192457,9	192665,2
2013,500	188549,6	188787,5	189466,1	192178,0	188742,6	189630,3	189552,8	189302,3	188626,0	192457,7	192665,4
2013,750	188548,6	188787,7	189466,2	192178,0	188742,6	189630,1	189552,7	189302,3	188626,4	192457,6	192665,6
2013,908	188550,2	188787,7	189466,3	192178,4	188742,6	189629,8	189552,9	189302,8	188625,9	192457,6	192665,4

