

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ГЕОДЕЗІЇ

ДЕХТЯРЬОВ Андрій Михайлович

УДК 528.88:004.9

**Геодезичне спостереження за деформаціями техногенних споруд
хвостосховища**

кваліфікаційна робота на здобуття першого
(бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю

G18 «Геодезія та землеустрій»

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор

Перебудов Володимир Володимирович

Кривий Ріг - 2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: будівельний

Кафедра: геодезії

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Спеціальність: G18 «Геодезія та землеустрій»

Затверджую

Зав. кафедрою Перегудов В.В.

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на бакалаврську роботу студенту

Дехтярєва Андрія Михайловича

Тема роботи: Геодезичне спостереження за деформаціями техногенних споруд хвостосховища

1. Керівник роботи: д.т.н., професор Перегудов В.В.

Затверджено наказом по КНУ від «28» листопада 2025 року № 897

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

3. Вхідні дані до роботи: Річні технічні звіти за результатами спостережень за плановим і висотним положенням пунктів контрольно-вимірювальної апаратури (КВА) на огорожувальних спорудах хвостосховища ПАТ «Інгулецького гірничо-збагачувального комбінату» за 2014 та 2015 роки, виконаних відділом спеціальних маркшейдерсько-геодезичних досліджень

ДП «УкрРудПром» Асоціації «Укррудпром» (договір № 2059-05 від 01.04.2015 р.). Проектна документація на реконструкцію хвостосховища «Об'єднане, IV карта» до відм. 166,0 м. Дані GPS-спостережень приймачами Topcon GR-5 та нівелювання нівеліром Trimble DINI 0.3 по 90+ пунктах КВА на греблях «Східна карта» і «Західна карта».

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

1. Загальні відомості про район робіт та об'єкт дослідження:
характеристика хвостосховища ПАТ «ІнГЗК» як об'єкта геодезичних спостережень, фізико-географічні, геологічні умови, обґрунтування необхідності геодезичного моніторингу деформацій.
2. Методика геодезичних спостережень за деформаціями споруд хвостосховища: класифікація деформацій, критерії безпечного стану гребель, методи визначення горизонтальних зміщень (метод створу, засічки, комбінований) і вертикальних осідань (нівелювання III класу); закладка реперів і станцій спостереження.
3. Геодезичні спостереження за плановим і висотним положенням пунктів КВА хвостосховища: GPS-вимірювання у статичному режимі, нівелювання III класу, оцінка точності вимірювань, аналіз горизонтальних зсувів і вертикальних осідань по горизонтах.
4. Проект організації геодезичних робіт з моніторингу деформацій хвостосховища: проектування опорної геодезичної мережі, МНК-зрівнювання і оцінка точності у програмному комплексі Leica Infinity, аналіз можливостей і переваг ПЗ.
5. Сучасні геодезичні прилади та технології при спостереженні за деформаціями: наземне лазерне сканування, безперервний GNSS-моніторинг, аерофотознімання з БПЛА, радарна інтерферометрія (InSAR); порівняльний аналіз обладнання.
6. Економічна частина: відомість трудових витрат, кошторис, планова собівартість, рентабельність, ТЕО застосування сучасного обладнання.

7. Екологія: екологічний стан Криворізького залізорудного району, вплив хвостосховища ПАТ «ІнГЗК» на навколишнє середовище, природоохоронні заходи.
8. Охорона праці та безпека життєдіяльності: аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів, розрахунок часу евакуації, пожежна безпека, розрахунок освітлення.

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

1. Схема мережі контрольно-вимірювальної апаратури (КВА) на огорожувальних греблях хвостосховища «Східна карта» і «Західна карта» ПАТ «ІнГЗК».
2. Схема опорної геодезичної мережі спостережень на хвостосховищі ПАТ «ІнГЗК» (два полігонометричні ходи 1 розряду, 31 пункт ПВО).
3. Графіки динаміки осідань пунктів КВА по горизонтах греблі «Східна карта» (гор. 13, 14, 15, 17 і нижче 13) та «Західна карта» (+99, +105, +112,5 м) за циклами спостережень 2015 року.

Терміни виконання кваліфікаційної (бакалаврської) роботи

№ з/п	Етап	Зміст робіт	Термін виконання	Примітка
1	Вибір та затвердження теми	Обрання теми, подання заяви, закріплення наукового керівника	10.02.2026	Виконано
2	Складання календарного плану	Узгодження структури та графіка виконання роботи з керівником	15.02.2026	Виконано
3	Опрацювання джерельної бази	Аналіз нормативних документів, наукових джерел та звітів ДП «УкрРудПром»	20.02.2026	Виконано
4	Формування вступу	Обґрунтування актуальності, мети, завдань, об'єкта і предмета дослідження	05.03.2026	Виконано

5	Виконання теоретичних розділів (Розд. 1–2)	Характеристика хвостосховища, методика геодезичних спостережень, класифікація деформацій	20.03.2026	Виконано
6	Збір та аналіз вхідних даних	GPS-спостереження і нівелювання пунктів КВА; матеріали звітів 2014–2015 рр.	05.04.2026	Виконано
7	Виконання практичного розділу (Розд. 3–4)	Аналіз деформацій пунктів КВА; проектування і зрівнювання геодезичної мережі в Leica Infinity	25.04.2026	Виконано
8	Виконання розділів 5	Аналіз сучасних приладів і технологій	05.05.2026	Виконано
9	Формування висновків і пропозицій	Узагальнення результатів дослідження, оцінка стану дамб	12.05.2026	Виконано
10	Перевірка на академічні запозичення	Подання роботи на перевірку програмою виявлення плагіату	15.05.2026	Виконано
11	Оформлення кваліфікаційної роботи	Приведення роботи у відповідність до вимог ДСТУ та кафедри	20.05.2026	Виконано
12	Подання роботи керівнику	Остаточна перевірка та надання відгуку наукового керівника	25.05.2026	Виконано
13	Подання на кафедру	Реєстрація, отримання допуску до захисту	01.06.2026	Виконано

ГРАФІК

підготовки бакалаврської роботи

Найменування розділів, перелік розроблених питань	Терміни подання науковому керівнику та консультантам	Примітка
1. Загальні відомості про район робіт та об'єкт дослідження. Методика геодезичних	02.03.2026	Виконано

спостережень за деформаціями (Розд. 1–2)		
2. Геодезичні спостереження за деформаціями огорожувальних споруд хвостосховища. Аналіз результатів (Розд. 3)	15.04.2026	Виконано
3. Проект організації геодезичних робіт. Сучасні прилади та технології моніторингу (Розд. 4–5)	25.04.2026	Виконано

Підписи консультантів і нормоконтролеру на закінчену бакалаврську роботу
із зазначенням розділів

Назва (номер розділу)	Науковий керівник, консультанти (ПІБ, науковий ступінь, наукове звання)	Дата підписання	Підпис
1. Загальні відомості про район робіт. Методика спостережень (Розд. 1–2)	Перегудов В.В. д.т.н., професор	20.03.2026	
2. GPS-спостереження, нівелювання, аналіз деформацій. Проект мережі в Leica Infinity (Розд. 3–4)	Перегудов В.В. д.т.н., професор	25.04.2026	
3. Сучасні технології моніторингу. (Розд. 5)	Перегудов В.В. д.т.н., професор	18.05.2026	

Науковий керівник _____ //

Завдання прийняв до виконання студент Дехтярьов А.М. _____ /

Дата «01» грудня 2025 р.

ЗМІСТ

№		Ст.
	Анотація	1
	Вступ	3
1.	РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РАЙОН РОБІТ	6
1.1.	Характеристика хвостосховища ПАТ «ІнГЗК» як об'єкта геодезичних спостережень	6
1.1.1.	Загальна характеристика та конструктивні особливості хвостосховища	7
1.2.	Фізико-географічна характеристика району робіт	11
1.3.	Геологічна та гідрогеологічна вивченість території робіт	14
1.4.	Особливості геологічної будови в районі розташування хвостосховища	16
1.5.	Тенденції виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру	17
1.6.	Обґрунтування необхідності геодезичного моніторингу деформацій техногенних споруд	19
	ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ	21
2.	РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ГЕОДЕЗИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗА ДЕФОРМАЦІЯМИ СПОРУД ХВОСТОСХОВИЩА	23
2.1.	Загальний устрій греблі хвостосховища	23
2.2.	Класифікація деформацій гідротехнічних споруд та методи їх визначення	25
2.3.	Організація натурних геодезичних спостережень	27
2.4.	Основні критерії безпечних деформацій ґрунтових гребель	29
2.5.	Методика визначення горизонтальних зміщень	31
2.5.1.	Метод створу	32
2.5.2.	Метод прямої кутової засічки	35
2.5.3.	Комбінований метод	37
2.6.	Методика визначення вертикальних зміщень	39
2.7.	Закладка реперів та станцій спостереження	40
	ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ	46
3.	РОЗДІЛ 3 ГЕОДЕЗИЧНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА ДЕФОРМАЦІЯМИ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ СПОРУД ХВОСТОСХОВИЩА ПАТ «ІНГЗК»	48

3.1.	Мережа контрольно-вимірювальної апаратури та організація спостережень	48
3.2.	Планово-висотні визначення положення пунктів КВА	50
3.2.1.	Характеристика GPS-вимірювань та оцінка їх точності	50
3.2.2.	Характеристика нівелірних ходів та оцінка їх точності	63
3.3	Аналіз результатів геодезичних спостережень	66
3.3.1.	Результати спостережень на хвостосховищі «Східна карта»	66
3.3.2.	Результати спостережень на хвостосховищі «Західна карта»	68
3.4.	Оцінка стану греблі за результатами геодезичних спостережень	68
	ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ	70
4.	РОЗДІЛ 4 ПРОЕКТ ОРГАНІЗАЦІЇ ГЕОДЕЗИЧНИХ РОБІТ З МОНІТОРИНГУ ДЕФОРМАЦІЙ ХВОСТОСХОВИЩА ПАТ «ІНГЗК»	72
4.1.	Автоматизована обробка геодезичних спостережень у програмному комплексі CREDO	72
4.1.1.	Порядок обробки геодезичних даних в CREDO-DAT	74
4.1.2.	Налаштування проекту та введення польових вимірювань	77
4.2.	Проектування та характеристика опорної геодезичної мережі спостережень	80
4.3.	Оцінка точності запроектованої мережі	82
	ВИСНОВКИ ДО ЧЕТВЕРТОГО РОЗДІЛУ	84
5.	РОЗДІЛ 5 СУЧАСНІ ГЕОДЕЗИЧНІ ПРИЛАДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПРИ СПОСТЕРЕЖЕННІ ЗА ДЕФОРМАЦІЯМИ ХВОСТОСХОВИЩА	86
5.1.	Класифікація та аналіз сучасних методів геодезичних вимірювань деформацій	86
5.1.1.	Методи дистанційного зондування	87
5.1.2.	Контактні методи геодезичного контролю	89
5.2.	Застосування наземних лазерних скануючих систем при моніторингу деформацій	90
5.3.	GPS/GNSS-технології у системі безперервного моніторингу хвостосховища	94
5.4.	Досвід маркшейдерсько-геодезичного забезпечення безпечної експлуатації хвостосховищ	96

	ВИСНОВКИ ДО П'ЯТОГО РОЗДІЛУ	99
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	100
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	103
	ДОДАТОК А	111
	ДОДАТОК Б	113
	ДОДАТОК В	116

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до дипломної роботи на тему «Геодезичне спостереження за деформаціями техногенних споруд хвостосховища ПАТ «Інгулецького гірничо-збагачувального комбінату»»:

179 с., 28 рис., 19 табл., 3 додатки, 77 літературних джерел.

Об'єкт дослідження — техногенні споруди хвостосховища ПАТ «Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат» (ПАТ «ІнГЗК»): огорожувальні греблі «Східна карта» та «Західна карта» з їх основами та прилеглими ділянками земної поверхні.

Предмет дослідження — методи, засоби та результати геодезичних спостережень за просторовими деформаціями (горизонтальними зміщеннями та вертикальними осіданнями) огорожувальних споруд хвостосховища ПАТ «ІнГЗК».

У роботі виконано аналіз природних, інженерно-геологічних та техногенних умов у районі розташування хвостосховища ПАТ «ІнГЗК». Розглянуто конструктивні особливості огорожувальних дамб висотою до 88 м, проведено оцінку їх відповідності вимогам міжнародних стандартів ICOLD та ANCOLD.

Обґрунтовано необхідність систематичного геодезичного моніторингу деформацій техногенних споруд хвостосховища. Розглянуто методики визначення горизонтальних зміщень (метод створу, метод прямої кутової засічки, комбінований метод) і вертикальних осідань (геометричне нівелювання III класу). Сформульовано критерії безпечних деформацій ґрунтових гребель і обґрунтовано оптимальні часові інтервали між циклами спостережень.

Виконані та проаналізовані результати інструментальних GPS-спостережень і нівелювання пунктів контрольно-вимірювальної апаратури (КВА) на горизонтах 13, 14, 15, 17 (гребля «Східна карта») і горизонтах +99 м, +105 м, +112,5 м (гребля «Західна карта») за чотирма циклами 2015 року. За результатами спостережень понад 90 пунктів КВА

встановлено, що стан обох дамб хвостосховища є задовільним, виявлені деформації мають консолідаційний характер і не перевищують нормативних значень.

Розроблено проект організації геодезичних робіт з моніторингу деформацій хвостосховища. Запроектована опорна геодезична мережа з двох полігонометричних ходів 1 розряду загальною довжиною 15,4 км (31 пункт ПВО). Оброблення польових матеріалів виконано у програмному комплексі Leica Infinity методом найменших квадратів; точність зрівнювання: відносна лінійна нев'язка 1:29 188 – 1:93 963, кутова нев'язка 14", СКП положення пунктів $\pm 2\text{--}3$ мм.

Проведено порівняльний аналіз сучасних геодезичних приладів і технологій: чотирисистемних GNSS-приймачів (Trimble R12i, Leica GS18 Ti), наземних лазерних сканерів (Leica RTC360, FARO Focus S350 Plus, Riegl VZ-600i), систем безперервного GNSS-моніторингу (GOCA, Trimble 4D Control). Розглянуто перспективи застосування аерофотознімання з БПЛА і радарної інтерферометрії (InSAR/PS-InSAR) для моніторингу деформацій хвостосховищ Кривбасу.

Розраховано кошторисну вартість комплексу геодезичних робіт на об'єкті — 351 641,71 грн., у т.ч. польові роботи 319 049,87 грн. Планова собівартість — 305 676,54 грн., рентабельність — 15,04%. Техніко-економічне обґрунтування підтвердило доцільність застосування сучасного геодезичного обладнання: $E_{\phi} = 0,144 > E_n = 0,12$.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ХВОСТОСХОВИЩЕ, ГЕОДЕЗИЧНИЙ
МОНІТОРИНГ, ДЕФОРМАЦІЇ ТЕХНОГЕННИХ СПОРУД,
GPS/GNSS-СПОСТЕРЕЖЕННЯ, КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНА
АППАРАТУРА (КВА), НІВЕЛЮВАННЯ, ЛАЗЕРНЕ СКАНУВАННЯ,
КРИВБАС, ГІРНИЧОДОБУВНИЙ РЕГІОН

ВСТУП

Гірничодобувна галузь України традиційно є одним із найбільш техногенно навантажених секторів економіки. Особливо це стосується Криворізького залізрудного басейну, де впродовж понад 120 років ведуться масштабні відкриті та підземні гірничі роботи. Невід'ємним елементом збагачувального виробництва тут є хвостосховища — великі гідротехнічні споруди для складування відходів збагачення залізної руди. Огороджувальні дамби таких споруд сягають висоти 80–100 м і більше, а їх площа нерідко перевищує 200–250 га. Будь-яка аварія на подібному об'єкті неминуче матиме катастрофічні наслідки — як для персоналу підприємства, так і для навколишніх населених пунктів.

Проблема деформацій споруд хвостосховищ є комплексною. З одного боку, тіло дамби постійно зазнає навантажень від ваги намитих хвостів і тиску пульпи. З іншого — основа дамби складена з різнорідних за міцністю ґрунтів, що в умовах постійного зволоження схильні до просідання і суфозії. До цього додаються сейсмічні впливи від масових вибухів на кар'єрах Кривбасу. Все це призводить до того, що деформації тіла греблі є не виключенням, а закономірністю, яку потрібно постійно контролювати і своєчасно виявляти.

Єдиним інструментом, який дає змогу об'єктивно фіксувати просторові зміщення споруд у часі, є систематичні геодезичні спостереження. Порівняно з іншими методами контролю — візуальними оглядами чи показаннями датчиків тиску — геодезичні вимірювання дозволяють отримати кількісні дані про величину і напрямок деформацій одночасно по всьому масиву спостережних пунктів. Саме тому нормативні документи (ДБН В.2.4-5, інструкції з маркшейдерських спостережень) зобов'язують підприємства проводити такі спостереження з чітко визначеною періодичністю — не рідше чотирьох разів на рік для верхніх горизонтів дамби.

Разом з тим традиційні методи геодезичних спостережень із застосуванням мірних стрічок і теодолітів давно застаріли. Сучасні умови

вимагають принципово іншого підходу. GPS-приймачі типу Topcon GR-5 дозволяють визначати координати пункту з точністю ± 3 мм у плані, електронні нівеліри Trimble DINI 0.3 забезпечують точність нівелювання ± 1.0 мм/км подвійного ходу. Наземні лазерні сканери відкривають можливість отримувати повну тривимірну модель поверхні дамби за лічені години без виходу персоналу в небезпечні зони. Камеральна обробка польових матеріалів у програмному комплексі CREDO дозволяє суттєво скоротити час від виконання вимірювань до отримання готового звіту.

Об'єктом дослідження у даній роботі є техногенні споруди хвостосховища ПАТ «Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат» (ПАТ «ІНГЗК»), а саме огорожувальні греблі «Східна карта» та «Західна карта». Хвостосховище розташоване в Інгулецькому районі міста Кривий Ріг, площа становить 245 га, максимальна висота існуючих огорожувальних дамб — 88 м. За класифікацією наслідків об'єкт відноситься до класу СС3 і вимагає особливо ретельного інструментального контролю.

Предметом дослідження є методи та результати геодезичних спостережень за горизонтальними зміщеннями і вертикальними осіданнями пунктів контрольно-вимірювальної апаратури (КВА), розташованих на різних горизонтах огорожувальних дамб хвостосховища.

Мета роботи — розробити і обґрунтувати методику геодезичного спостереження за деформаціями техногенних споруд хвостосховища ПАТ «ІНГЗК», виконати аналіз результатів інструментальних вимірювань та надати оцінку стану огорожувальних дамб за даними спостережень 2015 року.

Для досягнення цієї мети в роботі послідовно вирішуються такі завдання:

- 1) охарактеризувати природні, інженерно-геологічні та техногенні умови в районі розташування хвостосховища ПАТ «ІНГЗК»;
- 2) обґрунтувати необхідність систематичного геодезичного контролю стану огорожувальних споруд хвостосховища з урахуванням його конструктивних особливостей;

- 3) розглянути та порівняти методики геодезичних спостережень за горизонтальними зміщеннями і вертикальними осіданнями дамб хвостосховища;
- 4) виконати і проаналізувати результати GPS-вимірювань та нівелювання пунктів КВА на греблях «Східна карта» і «Західна карта» за 2015 рік;
- 5) розробити проект організації геодезичних робіт з моніторингу деформацій із застосуванням програмного комплексу CREDO та оцінити точність за проектованої мережі;
- 6) проаналізувати перспективні геодезичні технології — наземне лазерне сканування та GPS/GNSS-моніторинг — стосовно можливості їх застосування на хвостосховищах Кривбасу.

Практичне значення виконаної роботи полягає у тому, що запропонована методика спостережень і отримані результати можуть безпосередньо використовуватись службою маркшейдерсько-геодезичного моніторингу ПАТ «ІнГЗК» для оперативної оцінки стану дамб і своєчасного прийняття рішень щодо їх безпечної експлуатації. Крім того, розроблені підходи можуть бути тиражовані на інші хвостосховища Криворізького залізорудного басейну — ПівнГЗК, ЦГЗК, ПівдГЗК.

Дипломна робота складається зі вступу, восьми розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 179 сторінок, містить 28 рисунків, 19 таблиць і 77 бібліографічних посилань.

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РАЙОН РОБІТ ТА ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Характеристика хвостосховища ПАТ «ІнГЗК» як об'єкта геодезичних спостережень

При видобутку і збагаченні залізної руди утворюється значна кількість дрібнодисперсних відходів — так званих хвостів збагачення. На гірничо-збагачувальних комбінатах Криворізького басейну ці відходи транспортуються у вигляді водної пульпи по трубопроводах і складуються у спеціальних гідротехнічних спорудах — хвостосховищах. Хвостосховище являє собою штучно або природно утворену ємність, обмежену по периметру системою огорожувальних дамб, всередині якої наливається і накопичується тверда фаза пульпи, а освітлена вода повертається в систему оборотного водопостачання [1].

Огорожувальні дамби хвостосховищ мають комбіновану конструкцію. Первинні дамби обвалування, як правило, відсипаються із суглинистого ґрунту і слугують початковим контуром споруди. Надалі дамби нарощуються в міру заповнення ємності — методом наливу хвостів з кріпленням верхового укосу скельним розкритом або методом відсипки із скельних порід. У результаті висота окремих секцій дамб на великих хвостосховищах досягає 80–100 м і більше, а протяжність огорожувального контуру — кількох кілометрів. Така масштабність споруд зумовлює їх відповідальний характер і вимагає постійного геодезичного контролю.

За чинною класифікацією наслідків (відповідальності) хвостосховища з огорожувальними дамбами висотою понад 15 м відносяться до класу СС3 — найвищого класу — і є об'єктами IV або V категорії складності [5, 6]. Проектування та експлуатація таких споруд регулюється вимогами ДБН В.2.4-5, ДБН В.1.1-12 та галузевих нормативних документів. На міжнародному рівні еталонними вважаються стандарти ICOLD (Міжнародна комісія з великих гребель) та ANCOLD (Австралійський комітет з великих гребель), положення яких враховуються при проектуванні та оцінці технічного стану подібних об'єктів [12–19].

З точки зору нормативних вимог, підходи до класифікації гідротехнічних споруд у вітчизняних і міжнародних стандартах принципово схожі. В обох випадках береться до уваги можлива матеріальна шкода, вплив на навколишнє середовище та кількість людей, які можуть постраждати у разі аварії. Відмінність полягає в деталях: українські норми класифікують об'єкти насамперед за висотою дамб, тоді як ICOLD прив'язує категорію наслідків до рівня розрахункової повені.

Окремої уваги заслуговує питання сейсмічної безпеки. Криворізький регіон, хоча й не відноситься до зон підвищеної сейсмічності, потребує врахування сейсмічних навантажень при проектуванні відповідальних споруд. Порівняльний аналіз ДБН В.1.1-12 [8] та рекомендацій ICOLD B72 [14] показує, що для умов України достатнім є прийняття максимального розрахункового землетрусу (МРЗ) з періодом повторюваності 5000 років. Подальше збільшення цього параметру до 10000 років, яке вимагають міжнародні стандарти для об'єктів класу «екстремальні», дає практично однакові результати через ефект насичення сейсмічної інтенсивності, характерний для платформних умов України.

Щодо фільтраційної безпеки, порівняльний аналіз ДБН В.2.4-5 та ICOLD B97 свідчить про близькість підходів. Ключовим принципом в обох випадках є вимога стійкості матеріалу тіла дамби до явища суфозії — вимивання дрібних часток під дією фільтраційного потоку. Це питання є особливо важливим для дамб, що зводяться наливним методом із матеріалу самих хвостів.

1.1.1 Загальна характеристика та конструктивні особливості

хвостосховища

Хвостосховище ПАТ «Інгулецького гірничо-збагачувального комбінату» — об'єднана «IV карта» — розташоване на промисловому майданчику комбінату в Інгулецькому районі міста Кривий Ріг. Споруда

належить до найбільших у Криворізькому залізорудному басейні. Основні технічні характеристики хвостосховища такі:

- площа хвостосховища — 245 га;
- існуюча відмітка гребеня дамби — 156,0 м;
- проектна відмітка після нарощування — 166,0 м;
- максимальна висота огорожувальних дамб — 88 м;
- загальна довжина огорожувального контуру — 5040 м.

Нарощування огорожувальних дамб від відмітки 156,0 м до відмітки 166,0 м передбачає відсипку матеріалу — хвостів збагачення — з кріпленням верхового укосу скельним розкритом. По низовому укосі передбачено влаштування перехідного шару з дрібного скельного матеріалу, що забезпечує дренажування і стійкість укосів. Ширина дамби по гребеню після нарощування становитиме 8,2 м, що відповідає вимогам до проїзду технологічного транспорту та розміщення геодезичного обладнання.

Для перевірки відповідності прийнятих проектних рішень вимогам міжнародних стандартів було виконано комплекс додаткових досліджень: лабораторне визначення динамічних характеристик намівних ґрунтів, геофізичні дослідження з оцінки потенціалу розрідження хвостів, розрахунки стійкості за прямим динамічним методом із урахуванням сейсмічних навантажень 8 балів за шкалою MSK-64, а також перевірні водогосподарські розрахунки.

За підсумками виконаних досліджень і розрахунків встановлено наступне:

- 1) Відповідно до вимог міжнародних стандартів хвостосховище «IV карта» класифіковано як «екстремальне» з типом можливих пошкоджень — «велике», а розрахунковий паводок визначається за критерієм розрахункової максимальної повені (РМП).
- 2) Гіпотетичні сценарії прориву огорожувальної дамби, проаналізовані відповідно до ICOLD B97, не призводять до необхідності перегляду прийнятих конструктивних рішень — зони затоплення при

розрахунковому прориві не охоплюють критично важливих об'єктів поза промисловим майданчиком.

3) Матеріал тіла дамб є практично стійким до суфозійного винесення, що підтверджено лабораторними дослідженнями гранулометричного складу хвостів.

4) Через конструктивні особливості споруди — відсутність контакту між насипними і наливними ділянками дамб — зосереджена фільтрація у тілі дамби виключена.

5) Величина надводного борту забезпечується на рівні 1 м вище максимального розрахункового рівня повені з урахуванням вільного регулюючого об'єму чаші (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Величина надводного борту відносно максимального рівня повені з урахуванням вільного об'єму чаші хвостосховища

6) Для сейсмічних умов Криворізького регіону прийнятий у проекті період повторюваності МРЗ — 5000 років — дає кількісні оцінки сейсмічності, практично ідентичні оцінкам для 10000 років, що свідчить про наявність ефекту насичення і обґрунтовує допустимість вітчизняного нормативу.

7) Геофізичні та лабораторні дослідження підтвердили, що наливні ґрунти чаші хвостосховища є динамічно стійкими і не схильні до розрідження при сейсмічних впливах розрахункової інтенсивності.

8) Фільтраційні розрахунки засвідчили коректність прийнятих рішень щодо конструкції дренажів і захисних призм; депресійна крива не виходить за межі тіла дамби.

9) Розрахунки напружено-деформованого стану при статичних навантаженнях не виявили зон з неприпустимими переміщеннями або концентрацією напружень. Розподіл осідань по гребеню дамби за результатами розрахунків наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Розрахункові осідання гребеня дамби хвостосховища

Пункт КВА	Осідання за рік, мм	Швидкість осідання, мм/міс	Примітки
НТ17-1	98	8,2	норма
НТ17-5	112	9,3	норма
НТ17-9	87	7,3	норма
НТ15-4	35	2,9	норма
НТ15-12	43	3,6	норма
НТ15-24	28	2,3	норма
НТ13-8	21	1,8	норма
НТ13-16	32	2,7	норма
НТ13-25	18	1,5	норма

10) Коефіцієнти запасу стійкості укосів для всіх розрахункових перерізів і сполучень навантажень відповідають вимогам як вітчизняних норм (мінімальний коефіцієнт 1,25), так і міжнародних стандартів ICOLD/ANCOLD (мінімальний коефіцієнт 1,50). Результати зведені у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Результати розрахунків стійкості огорожувальних дамб
хвостосховища

Розрахунковий переріз / сполучення навантажень	Фактичний коефіцієнт запасу Кф	Мінімально допустимий Кдоп	Відповідність нормам
Верховий укіс (статичний)	1,54	1,50	відповідає
Низовий укіс (статичний)	1,61	1,50	відповідає
Верховий укіс (сейсмічний, 6 балів)	1,32	1,25	відповідає
Низовий укіс (сейсмічний, 6 балів)	1,38	1,25	відповідає
Верховий укіс (сейсмічний, 8 балів)	1,27	1,10	відповідає
Низовий укіс (сейсмічний, 8 балів)	1,29	1,10	відповідає

Таким чином, технічні рішення, прийняті у проекті реконструкції хвостосховища «ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг. Об'єднане, IV карта» до відм. 166,0 м», відповідають вимогам міжнародних стандартів ICOLD і ANCOLD. Водночас результати розрахунків підтверджують, що деформаційні процеси в тілі дамби (насамперед консолідаційні осідання верхніх горизонтів) є закономірними і потребують систематичного геодезичного контролю для своєчасного виявлення відхилень від нормативних значень.

1.2 Фізико-географічна характеристика району робіт

Хвостосховище ПАТ «ІнГЗК» розташоване в межах міста Кривий Ріг — одного з найбільших промислових центрів України. Місто витягнуте в суб меридіональному напрямі, його крайні точки фіксуються координатами: на півдні — 47°36' пн. ш. (хвостосховище Інгулецького ГЗК), на півночі — 48°12' пн. ш. (хвостосховище Північного ГЗК). По довготі місто займає смугу

від 33°08' до 33°34' сх. д. Таке розташування відповідає центральній частині Придніпровської височини — у межах Українського кристалічного щита.

У геоморфологічному плані північна частина Криворіжжя тяжіє до Придніпровської височини, а південна — до слабонахиленої Причорноморської низини. Відповідно спостерігається зменшення абсолютних висот із півночі на південь: від 195–170 м до 85–90 м, а також зниження ступеня розчленованості рельєфу з 2,3–3,5 км/км² до 0,3–0,5 км/км². Поверхня вододілів і підвищених терас повсюдно вкрита лесоподібними суглинками, які змиті лише на крутих схилах річкових долин.

Рельєф Криворіжжя суттєво ускладнений техногенними формами, що виникли внаслідок тривалої гірничо промислової діяльності. Виділяються три групи техногенних утворень рельєфу:

- провали і просідання земної поверхні над виробленим простором підземних шахт;
- кар'єрні виїмки і відвали розкривних порід від відкритих гірничих робіт;
- шламосховища і хвостосховища збагачувальних фабрик.

Просідання поверхні над шахтними виробками обумовлені застосуванням системи видобутку руди з обваленням покрівлі, яка використовується з кінця 1920-х років. Зони обвалення тягнуться переривистими смугами над ділянками підземного видобутку і ускладнюють господарське використання відповідних територій [25]. Саме через це при організації геодезичних мереж на хвостосховищах необхідно ретельно аналізувати стабільність ґрунтової основи в місцях закладки вихідних реперів.

Клімат Криворізького регіону відноситься до атлантико-континентального помірного типу з недостатнім зволоженням. Географічна широта 48° пн. ш. визначає такі характеристики: тривалість сонячного сяяння — 2102 год/рік, висота сонця над горизонтом від 18,6° у грудні до 65,4° у червні, тривалість світлового дня від 8 год 07 хв до 15 год 53

хв. Атмосферний тиск у середньому становить 753,7 мм рт. ст., зимою підвищується до 788,1 мм рт. ст.

Переважний напрямок вітрів — північний (49% повторюваності) та східний. Влітку частіше відзначаються вітри північно-західного і північного напрямків, в решту сезонів — північно-східні й північні. Штилі трапляються переважно на початку осені й влітку (близько 3 діб на місяць). Ці особливості мають практичне значення для організації польових геодезичних спостережень: сильні вітри впливають на стійкість приладів і точність відлічування, а пилові бурі, типові для сухого степового клімату, погіршують оптичну видимість.

Гідрографічна мережа Криворіжжя представлена вісьмома річками басейну Дніпра. Головна водна артерія — р. Інгулець з притоками Саксагань, Зелена, Жовта, Бокова та ін. Річки характеризуються різко вираженою нерівномірністю стоку: на весняну повінь (квітень) припадає близько 85% річного стоку, на літо — 8%, на осінньо-зимовий період — 7% [26]. Улітку малі річки практично пересихають, що є важливим гідрологічним чинником при проектуванні водного балансу хвостосховища.

Розрахункові метеорологічні характеристики Інгулецького району — кількість опадів і випаровування при різних рівнях забезпеченості, а також об'єми атмосферних опадів, що надходять у чашу хвостосховища, наведено у табл. 1.3. Ці дані є базовими при водогосподарських розрахунках і визначенні необхідного вільного об'єму для акумуляції паводкових вод.

Таблиця 1.3 – Метеорологічні характеристики Інгулецького району (забезпеченість, %)

Характеристика	Одиниці виміру	15	25	50	75	85
Річна кількість опадів	мм	582	505	426	351	251
Випаровування з поверхні суші	мм	484	450	420	396	371

Об'єм опадів у хвостосховище	млн. м ³	5,41	4,70	3,96	3,26	2,36
Об'єм опадів на ставок оборотного водопостачання	млн. м ³	1,86	1,16	0,98	0,81	0,58

Наведені дані свідчать, що при 50%-й забезпеченості (середній рік) річна кількість опадів становить 426 мм, а в посушливі роки (85%-а забезпеченість) може знижуватись до 251 мм. Об'єм атмосферних опадів, що надходять безпосередньо в чашу хвостосховища, при цьому коливається від 3,96 до 2,36 млн. м³. Ці дані необхідно враховувати при плануванні режиму геодезичних спостережень: паводкові та зливові події можуть спричиняти нерівномірне зволоження тіла дамби і тимчасову активізацію деформаційних процесів.

1.3 Геологічна та гідрогеологічна вивченість території

У геоструктурному відношенні район досліджень приурочений до центральної частини Українського кристалічного щита (УКЩ). Докембрійський кристалічний фундамент складений метаморфічними і магматичними породами і повсюдно перекритий осадовим чохлам палеогенового, неогенового та четвертинного віку. Саме особливості будови цього чохла визначають умови закладки реперів і стабільність ґрунтової основи споруд хвостосховища [28].

Кристалічні породи представлені утвореннями саксаганської та гданцівської свит криворізької серії, а також гранітами і мігматитами нижнього протерозою. Саксаганська світа — головна рудоносна товща Кривбасу — складена залізистими кварцитами (джеспілітами) і сланцями. Кристалічні породи залягають на відмітках від 65 до 85–95 м і у верхній частині вивітрені та тріщинуваті до глибини 10–15 м, що суттєво знижує їх несучу здатність як основи споруд [29, 31].

Осадовий чохол, знизу вгору, представлений такою стратиграфічною колонкою:

- каоліни первинні (білі і сірувато-білі, щільні, напівтверді) — потужність від 1–3 до 20–25 м, залягають безпосередньо на кристалічних породах;
- відклади полтавської серії — переважно різнозернисті піски з лінзами глин, сумарна потужність до 18 м;
- нерозчленована товща червоно-бурих глин — поширена повсюдно, за винятком балок, потужність 15–18 м;
- лесоподібні суглинки плейстоцену і голоцену — верхній горизонт осадового чохла, потужність 10–12 м;
- техногенні відклади та алювій балок і річкових долин.

Особливу роль для оцінки стабільності основи дамб відіграє характер намивних ґрунтів (шламів) у чаші хвостосховища. Намивні відклади поширені в межах усієї чаші, досягаючи найбільших потужностей у приплотинних зонах. Їх фізико-механічні властивості суттєво змінюються залежно від відстані від місця намиву і ступеня консолідації. Свіжоамиті хвости мають низьку несучу здатність і схильні до значних осідань, що є одним із головних чинників деформацій дамб [31].

Гідрогеологічні умови в районі визначаються наявністю кількох водоносних горизонтів. У межах осадового чохла виділяються горизонти четвертинних, неогенових і палеогенових відкладів. У кристалічному фундаменті водоносними є тріщинуваті зони різних структурно-тектонічних комплексів. Серед них найбільш практично значущими є водоносні горизонти саксаганської і скелеватської свит, які мають гідравлічний зв'язок з поверхневими водами і хвостосховищами. Взаємодія цих горизонтів з фільтраційними водами хвостосховища є суттєвим чинником екологічного ризику і потребує постійного моніторингу.

1.4 Особливості геологічної будови в районі розташування

хвостосховища

Сучасна геодинаміка земної поверхні в межах Кривбасу зумовлена взаємодією кількох факторів. По-перше, це блокова тектоніка УКЩ: Інгулецький і Саксаганський структурні блоки розмежовані Криворізько-Кременчуцьким глибинним розломом, вздовж якого відбуваються диференційовані вертикальні рухи. По-друге — техногенна складова, пов'язана з багаторічним видобутком залізної руди і пов'язаними з ним деформаціями земної поверхні над підробленими ділянками.

Геоморфологічним відображенням диференційованих рухів Інгулецького і Саксаганського блоків є конфігурація вододілу між лівими притоками р. Інгулець і правими притоками середнього Дніпра. При переході від Інгулецького до Саксаганського блоку відбувається різка зміна орієнтування вододілу — із субширотного на субмеридіанальне, причому амплітуда зміщення становить близько 35 км у південному напрямку. Це свідчить про різні швидкості і знаки сучасних вертикальних рухів суміжних блоків.

Зазначені геологічні особливості мають безпосереднє значення для організації геодезичного моніторингу. Пункти опорної геодезичної мережі, що служать вихідними при спостереженнях за деформаціями дамб, повинні бути закладені у стабільних геологічних умовах — поза зонами тектонічних порушень і підробленими ділянками. Район Кривбасу має розвинену геодезичну інфраструктуру: державну нівелірну мережу II класу (з прив'язкою до репернів Чорного та Азовського морів — Маріуполь, Одеса, Севастополь, Генічеськ), густу мережу пунктів тріангуляції 1–3 класів і топографічну основу масштабів 1:10 000 – 1:100 000 [32].

1.5 Тенденції виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру

Дніпропетровська область, до якої адміністративно належить Кривий Ріг, є одним із найбільш індустріально навантажених регіонів України. Висока концентрація гірничодобувних, металургійних і хімічних підприємств формує значний потенціал техногенної небезпеки. За статистикою 2010–2015 років, показник небезпеки надзвичайних ситуацій у регіоні стабільно залишається вищим за середньоукраїнський, що проілюстровано на рис. 1.2.

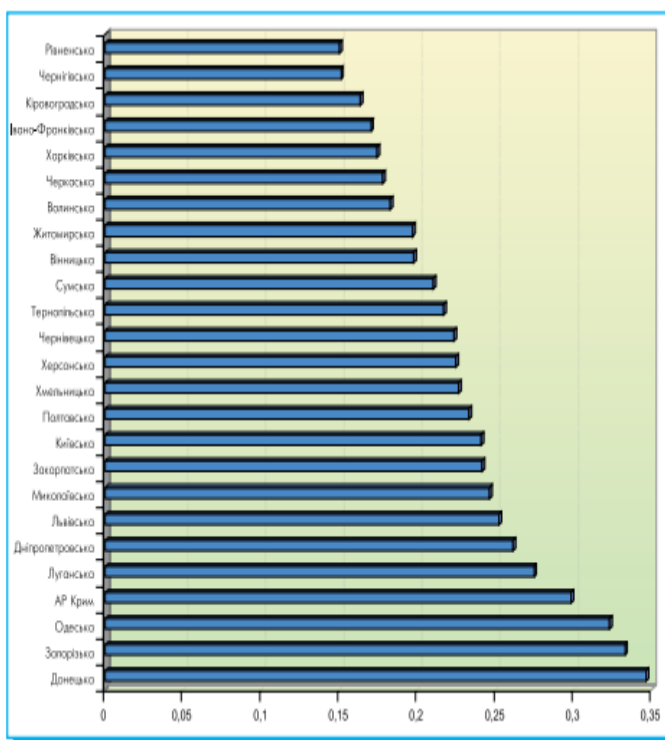


Рис. 1.2. Показник небезпеки надзвичайних ситуацій по регіонах України за статистикою 2010–2015 років

Головною причиною зростання ризику НС є прогресуюче старіння основних виробничих фондів. На більшості підприємств регіону ступінь їх зношеності перевищує 50%, а темпи

оновлення обладнання — недостатні. В умовах тривалого недофінансування відновлення основних фондів потенційно небезпечні об'єкти щорічно втрачають залишковий запас надійності. Це особливо критично для гідротехнічних споруд — хвостосховищ і ставків-відстійників, порушення цілісності яких може мати незворотні екологічні та людські наслідки.

Прогноз кількості надзвичайних ситуацій техногенного характеру на п'ять років, розроблений на основі статистичних даних попередніх років, свідчить про тенденцію до збереження або зростання їх кількості (рис. 1.3).

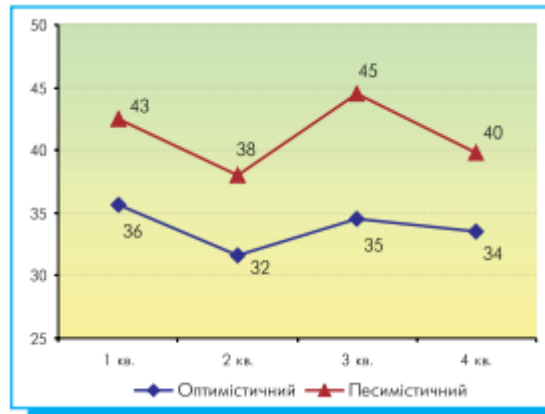


Рис. 1.3. Прогноз кількості надзвичайних ситуацій техногенного характеру на п'ять років за даними попередніх років

Серед природних факторів, що загострюють ситуацію, — активізація геологічних процесів у зонах гірничопромислових агломерацій: зсувні явища, підтоплення земель, карстові процеси. Прогнози НАН України передбачають, що в умовах збереження нинішнього техногенного навантаження кількість природних НС в Україні становитиме 120–145 на рік. При цьому в гірничодобувних регіонах, де техногенні впливи посилюють дію природних факторів, ця цифра може виявитися значно вищою.

Для хвостосховищ як специфічного типу техногенно небезпечних об'єктів деформаційні ризики є особливо значущими. Аварія на хвостосховищі класу СС3 із об'ємом накопичених відходів понад 1 млрд. м³ і висотою дамб понад 80 м — це катастрофа регіонального масштабу. Витрати на попередження такої аварії шляхом систематичного моніторингу — за оцінками міжнародних експертів — майже у 15 разів менші від витрат на ліквідацію її наслідків [36]. Саме цим обґрунтовується доцільність запровадження постійнодіючої системи геодезичного спостереження за станом споруд хвостосховища.

1.6 Обґрунтування необхідності геодезичного моніторингу деформацій техногенних споруд

Техногенний вплив на земну поверхню в гірничопромислових районах — явище складне і багатофакторне. Підземні виробки знижують несучу здатність гірського масиву; відкриті кар'єри і відвали змінюють природний розподіл навантажень на ґрунтову товщу; хвостосховища і ставки-відстійники зволожують основу і спричиняють підйом рівня підземних вод. Все це разом із природними тектонічними рухами формує складну деформаційну обстановку, яка негативно позначається на стабільності інженерних споруд і пунктів геодезичної мережі.

Аналіз статистики надзвичайних ситуацій у Дніпропетровській області дозволяє оцінити відносний внесок різних факторів у розвиток деформаційних процесів земної поверхні (рис. 1.4). Серед досліджених чинників домінуючим є техногенний: його частка за різними оцінками сягає 60–70% від загального обсягу виявлених деформаційних проявів.



Рис. 1.4. Ступінь впливу досліджуваних факторів на розвиток деформаційних процесів земної поверхні за статистичними даними НС у Дніпропетровській області

З позицій теорії геодинаміки земна кора являє собою ієрархічно-блокове середовище, кожна структурна одиниця якого перебуває у постійному русі відносно сусідніх. Встановлено, що тектонічні порушення навіть невисокого рангу мають достатню рухливість — як трендову

(спрямовану), так і динамічну (коливальну). За даними мережі IGS (International GNSS Service), яка налічує понад 1000 обсерваторій на всіх континентах, трендові швидкості переміщення літосферних плит становлять від 10 до 50 мм/рік, а у зонах регіональних розломів можуть бути порівнянними з техногенними деформаціями [43].

Саме тому розрізнити «природну» складову деформацій від «техногенної» на практиці вкрай складно. Надійне вирішення цього завдання можливе лише за умови безперервного або регулярного геодезичного моніторингу з достатньою густотою спостережних пунктів та у прив'язці до стабільних вихідних реперів, розташованих поза зоною техногенного впливу.

Сучасні GPS/GNSS-технології надають принципово нові можливості для організації такого моніторингу. По-перше, геодезичні спостереження за допомогою GPS-обладнання можна проводити у будь-яку пору доби і за будь-яких погодних умов, без прямої оптичної видимості між пунктами. По-друге, цифрові технології дозволяють автоматизувати збір даних і суттєво скоротити вплив людського фактора на результати вимірювань. По-третє, одночасне визначення всіх трьох координат (X, Y, H) у єдиній просторовій системі забезпечує комплексну оцінку деформаційного стану об'єкта [43].

Слід відзначити і досвід використання програмно-апаратних комплексів реального часу — таких як система GOCA (GPS-based Online Control and Alarm System), — що довели свою ефективність при моніторингу природних зсувів і лінійних інженерних споруд (мости, дамби). Ці комплекси здатні виявляти критичні деформації у режимі RTK (Real Time Kinematics) і негайно сповіщати персонал об'єкта. Застосування подібних рішень на хвостосховищах Кривбасу є перспективним напрямом розвитку системи геодезичного моніторингу.

Необхідність геодезичного моніторингу деформацій дамб хвостосховища зумовлена комплексом чинників: природними тектонічними рухами, консолідаційними осіданнями намівних ґрунтів, фільтраційними процесами у тілі дамби і її основі, а також динамічними впливами від

масових вибухів на кар'єрах. Кожен з цих чинників окремо не є критичним, але їх поєднання у несприятливих умовах може призвести до швидкого розвитку деформацій і катастрофічної аварії. Своєчасне виявлення небезпечних тенденцій шляхом систематичних геодезичних вимірювань — єдина надійна гарантія безпечної експлуатації споруди.

ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ

За результатами аналізу природних, інженерно-геологічних та техногенних умов у районі розташування хвостосховища ПАТ «ІнГЗК» можна зробити такі висновки:

- 1) Хвостосховище «Об'єднане, IV карта» є великою гідротехнічною спорудою класу ССЗ із площею 245 га, висотою дамб до 88 м і загальною довжиною огорожувального контуру 5040 м. Технічні рішення прийнятого проекту нарощування до відм. 166,0 м відповідають вимогам міжнародних стандартів ICOLD і ANCOLD.
- 2) Клімат Криворізького регіону помірно-континентальний з недостатнім зволоженням (середня річна кількість опадів 426 мм при 50%-й забезпеченості). Паводкові події спроможні тимчасово активізувати деформаційні процеси, що вимагає врахування при плануванні режиму спостережень.
- 3) Геологічна будова основи хвостосховища характеризується складним літологічним розрізом з 17 інженерно-геологічними елементами. Намивні ґрунти — шлами — в приплотинних зонах мають значну потужність і є основним джерелом консолідаційних осідань дамб.
- 4) Район Кривбасу перебуває в зоні підвищеного техногенного ризику. Зношеність основних виробничих фондів у середньому складає 50%. Системи аварійного оповіщення потребують модернізації. Витрати на попередження аварій шляхом моніторингу у 15 разів менші від витрат на їх ліквідацію.

- 5) Домінуючим фактором деформаційних процесів у Дніпропетровській області є техногенний (60–70%). Розмежування техногенної та природної складових деформацій можливе лише при наявності систематичних геодезичних спостережень із прив'язкою до стабільних вихідних реперів.
- 6) GPS/GNSS-технології і системи моніторингу в режимі реального часу (RTK, GOCA) є перспективним напрямом розвитку геодезичного контролю стану дамб хвостосховища і забезпечують можливість раннього виявлення критичних деформацій.

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ГЕОДЕЗИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗА ДЕФОРМАЦІЯМИ СПОРУД ХВОСТОСХОВИЩА

2.1 Загальний устрій греблі хвостосховища

Хвостове господарство гірничо-збагачувального комбінату — це комплекс інженерних споруд і комунікацій, призначених для транспортування, укладання і зберігання відходів збагачення, а також для повернення освітленої оборотної води у виробничий процес. До його складу входять три взаємопов'язані системи: гідравлічного транспортування хвостів, гідравлічного їх укладання у чашу хвостосховища та оборотного водопостачання [44].

Система гідравлічного укладання включає безпосередньо хвостосховище, захисні дамби і водоскидні споруди. Система оборотного водопостачання забезпечує збір і повернення освітленої води та складається з фільтраційної і дренажних насосних станцій, придамбового дренажу і лотка освітленої води. Система транспортування хвостів включає пульпонасосні станції, магістральні і розподільні пульповоди та аварійні ємності. Усі три системи функціонують у безперервному взаємозв'язку, тому порушення будь-якої ланки відбивається на роботі всього комплексу.

Основні технічні показники хвостосховища ПАТ «ІнГЗК» за проектом нарощування:

- відмітка гребеня дамби — 156,0 м (існуюча) / 166,0 м (проектна);
- місткість хвостосховища — понад 66 тис. м³;
- площа дзеркала — 366,5 га;
- термін розрахункової експлуатації — 5 років після нарощування.

Заповнювана ємність хвостосховища конструктивно поділяється на дві зони: пляж складованих хвостів (намивна зона, де відбувається відкладання твердої фази) і відстійний ставок (де відбувається освітлення пульпи). Ширина пляжу є одним із головних контрольованих параметрів безпечної експлуатації — її зменшення нижче нормативного значення (50 м згідно з

вітчизняними нормами) свідчить про порушення режиму наміву або надмірне заповнення чаші.

Огороджувальна дамба хвостосховища ПАТ «ІнГЗК» має кам'яно-накидну конструкцію з протифільтраційним екраном із суглинку. Кам'яне накидання виконувалось із рядових кварцитів, що видобуваються у суміжних кар'єрах. На контакті суглинкового екрану з кам'яним накиданням улаштовується двошаровий зворотний фільтр зі щебеню для запобігання суфозійному розмиванню тонкодисперсних частинок. По верховому укосі на відмітці +90,00 м влаштована берма завширшки 4,0 м; по низовому — берми на відмітках +95,00 м і +85,00 м.

Основа дамби складена вапняками (ясно-сірими і зеленувато-сірими з прошарками глини і піску), потужністю до 13 м, та підстилаючими каолінами потужністю до 5 м. Конструкція греблі вкачування аналогічна основній дамбі, проте в її основі залягають лесоподібні суглинки і піски. На окремих ділянках (ПК 12+00 – ПК 25+42) для перерізання пісків у підставі греблі влаштований суглинковий зуб завглибшки до 3,0 м, що обмежує шлях фільтрації та знижує фільтраційний тиск.

Водовідвідна система хвостосховища включає два залізобетонні водоскидні колодязі діаметром 11 м кожний, обладнані водоскидними вікнами з шандрами. Колодязь №1 забезпечує скидання води в обсязі 16 м³/с у діапазоні відміток від +85,00 до +96,00 м. Колодязь №2 обслуговує верхню частину чаші. Відведення освітленої води до ставка оборотного водопостачання здійснюється по залізобетонному лотку прямокутного перерізу (2,5 × 2,0 м, загальна довжина 1473 м), частина якого (ПК 4+13 – ПК 7+66) побудована методом щитового проходки діаметром 3,2 м. Кінцева ділянка лотка обладнана воронкою розмиву для гасіння швидкості потоку.

З точки зору організації геодезичного контролю конструктивні особливості дамби визначають такі умови спостережень: висота споруди понад 80 м обумовлює значну відстань між ярусами реперів (від нижніх горизонтів до гребеня); наявність берм і кам'яного накидання по низовому

укошу ускладнює пряму видимість між пунктами на різних горизонтах; тривале намівання хвостів забезпечує поступове і нерівномірне навантаження на основу, що зумовлює різну динаміку осідань на різних ділянках греблі.

2.2 Класифікація деформацій гідротехнічних споруд та методи їх визначення

Гідротехнічні споруди, і особливо намівні дамби хвостосховищ, перебувають під постійним впливом складної системи навантажень: власної ваги тіла дамби, гідростатичного і фільтраційного тиску з боку пульпи і підземних вод, температурних деформацій, динамічних впливів від вибухів на кар'єрах. Під дією цих факторів у споруді неминуче виникають деформації — зміни просторового положення її окремих частин відносно початкового стану.

У геодезичній практиці під деформацією традиційно розуміють зміну положення контрольованого пункту (марки, репера) у просторі за певний проміжок часу. Зміна форми споруди при цьому розглядається як похідна від функції зміщень. Залежно від напрямку деформації поділяються на:

- вертикальні — осідання (зміщення вниз) або підняття (випирання) окремих елементів споруди;
- горизонтальні — зсуви в площині, нормальній до осі дамби (у бік верхнього або нижнього б'єфу), або вздовж осі дамби;
- нахили — кутові зміни положення споруди або її елементів у вертикальній площині.

Осідання дамби складається з двох компонент: осідання власне тіла споруди (внаслідок ущільнення матеріалу при зростанні навантаження) і осідання основи (внаслідок стиснення підстилаючих ґрунтів під тиском ваги дамби). Для оцінки загального осідання гребеня дамби при проектуванні використовується емпірична формула Лаутона і Лестера, одержана на основі

статистичного оброблення даних натурних спостережень на численних об'єктах:

$$S = 0,001 \cdot H^{3/2} n_{пл} \quad (2.1)$$

де $H_{пл}$ — висота дамби, м; S — очікуване осідання гребеня, мм.

Так, для дамби висотою 88 м (ПАТ «ІнГЗК») формула дає орієнтовне осідання $S = 0,001 \cdot 88^{1.5} \approx 825$ мм. Це — грубе наближення, яке не враховує деформаційні характеристики матеріалів і фактор часу, але корисне для попередньої оцінки величини будівельного підйому при проектуванні. Для дамб низьких і середньої висоти осідання гребеня, як правило, не перевищує 1% висоти споруди.

Горизонтальні зміщення гребеня по нормалі до осі дамби виникають внаслідок зміни рівня пульпи у чаші (при підвищенні рівня — у бік нижнього б'єфу, при зниженні — у бік верхнього). За наявними даними натурних спостережень на кам'яно-земляних і кам'яно-накидних дамбах горизонтальні зміщення, як правило, не перевищують 0,3–0,5 від максимальних вертикальних осідань. Вдовж осі дамби зміщення виникають при нерівномірних осіданнях по довжині споруди і можуть досягати 0,2–0,3 від нормальних зміщень.

Оцінка стану споруди виконується за величинами деформацій, вимірними у характерних точках, зафіксованих на конструктивних елементах дамби. Процес деформування описується функцією зміни просторового положення пункту за обраний інтервал часу щодо прийнятого початкового стану. Важливо, що окремий замір дає лише поточний стан, тоді як для прийняття рішень необхідний аналіз динаміки — тренду змін і їх швидкості.

Геодезичні методи контролю деформацій поділяються на дві групи. Висотні спостереження (нівелювання) дозволяють визначити вертикальні переміщення (осідання) пунктів на дамбі відносно вихідних реперів. Планові

спостереження (методи створів, засічок тощо) дозволяють визначити горизонтальні зсуви. Разом ці два види спостережень забезпечують повну просторову картину деформаційного стану споруди. В умовах широкого впровадження GPS/GNSS-технологій стало можливим отримувати всі три координати контрольного пункту одночасно в єдиній системі відліку, що суттєво спрощує організацію моніторингу.

2.3 Організація натурних геодезичних спостережень

Натурні спостереження на хвостосховищі слугують двоєдиній меті: по-перше, вони дозволяють перевірити правильність проектних розрахунків і оцінити відповідність реальної поведінки споруди теоретичним прогнозам; по-друге, вони забезпечують оперативний контроль поточного стану об'єкта і є підставою для прийняття рішень при виникненні нестандартних ситуацій. Спостереження проводяться протягом усього терміну існування хвостосховища — від початку будівництва до консервації та рекультивації [44].

За своїм характером і призначенням натурні спостереження поділяються на два типи: обов'язкові та спеціальні.

Обов'язкові спостереження передбачені нормативними документами і проектом для всіх хвостосховищ класу СС3. Їх перелік включає:

- контроль ширини пляжу і різниці відміток між гребенем дамби і рівнем ставка (не менше 1 м за вимогами ICOLD);
- контроль якості наміву матеріалу в огорожувальну дамбу (гранулометричний склад, ступінь ущільнення);
- геодезичні спостереження за деформаціями тіла і основи дамби (вертикальні і горизонтальні переміщення);
- контроль фільтраційного режиму і впливу фільтрату на прилеглу територію;
- моніторинг заповнення чаші і залишкової місткості хвостосховища.

Спеціальні спостереження проводяться у разі потреби дослідження конкретних процесів або перевірки гіпотез. До них відносяться дослідження напружено-деформованого стану окремих елементів, консолідаційні спостереження, оцінка впливу сейсмічних і вібраційних навантажень, температурний моніторинг тощо. Необхідність таких спостережень обґрунтовується у спеціальній технічній програмі, що розробляється із залученням профільних науково-дослідних установ.

Проект натурних спостережень складається з пояснювальної записки і комплексу креслень розміщення контрольно-вимірювальної апаратури (КВА). Пояснювальна записка повинна містити:

- мету і конкретні завдання спостережень;
- склад, обсяг і методику вимірювань;
- перелік і технічні характеристики КВА;
- методику оброблення результатів і оцінки точності;
- терміни виконання кожного циклу спостережень.

Щодо термінів проведення спостережень нормативні документи рекомендують наступне:

- а) вимірювання осідань під час активного заповнення чаші — щомісячно протягом першого року; після стабілізації швидкості осідань — один раз на квартал; після завершення активного заповнення — двічі на рік (влітку і взимку); після практичного затухання осідань — один раз на рік або рідше.
- б) вимірювання горизонтальних зсувів починають одночасно з нівелюванням — з моменту закладки марок. У період активного заповнення чаші — 4–5 разів на рік; після заповнення — 1–2 рази на рік.

На практиці для хвостосховищ ПАТ «ІнГЗК» прийнята така схема: по горизонтах 13, 14, 15 і 17 греблі «Східна карта» і по горизонтах +99 м, +105 м, +112,5 м греблі «Західна карта» проводиться 4 цикли спостережень на рік; по нижніх горизонтах греблі «Східна карта» — 1 щорічний цикл. Це

відповідає рекомендованій нормативній мінімальній частоті для активно функціонуючих хвостосховищ.

2.4 Основні критерії безпечних деформацій ґрунтових гребель

Оцінка безпечності стану дамби ґрунтується не на абсолютній величині деформацій, а на їх динаміці — швидкості і характері зміни в часі. Це принципово важлива обставина: значне осідання, яке поступово затухає, є нормою для ущільнювальних процесів у тілі дамби; натомість навіть незначне прискорення деформацій може бути ознакою початку аварійного процесу. Виходячи з багаторічного досвіду спостережень на об'єктах гідротехнічного будівництва, введені такі основні параметри контролю:

- S_t — поточна величина деформації (осідання) у момент часу t , мм;
- S_k — критичне (граничне) значення деформації, передбачене проектом, мм;
- V_t — поточна швидкість зміни деформації (інтенсивність), мм/міс;
- V_k — максимально допустима (критична) швидкість деформації, мм/міс;
- t_D — час наростання деформації, місяці.

На підставі цих параметрів сформульовані два основних критерії безпечного стану споруди. Критерій інтенсивності деформації:

$$0 \leq V_t \leq V_k \quad (2.2)$$

Цей критерій означає, що поточна швидкість деформації не повинна перевищувати критичну, встановлену проектною організацією. Для хвостосховищ у нормальному режимі консолідації критична швидкість приймається у діапазоні $1 \leq V_k \leq 10$ мм/міс. Вихід за верхню межу цього діапазону є сигналом для позачергового обстеження і розгляду питання про вжиття запобіжних заходів.

Критерій допустимої величини деформації:

$$S_{min} - \Delta s \leq S_t \leq S_{max} + \Delta s \quad (2.3)$$

де Δs — похибка геодезичних вимірювань (загальний інтервал визначення). Зазвичай $\Delta s = 15\text{--}20$ мм. Фізичний зміст критерію полягає в тому, що поточне осідання не повинно перевищувати проектне значення більш ніж на величину похибки вимірювань.

Поточна інтенсивність деформації обчислюється як

$$V_n = \Delta S_n / \Delta t_n \quad (2.4)$$

або у диференційній формі

$$V_n = dS/dt \quad (2.5)$$

де n — номер циклу вимірювань. Прирошення осідань між суміжними циклами визначається як:

$$\Delta S_n = S_n - S_{n-1} \quad (2.6)$$

У нормально функціонуючій дамбі осідання носять затухаючий характер: із часом V_t зменшується і прямує до нуля. Практика спостережень показує як лінійний, так і нелінійний характер зміни деформацій. Нелінійний (логарифмічний, степеневий) закон розвитку осідань характерний для консолідаційних процесів у намівних ґрунтах і описується рівняннями виду

$S = a \cdot \ln(t) + b$ або $S = a \cdot t^b$, де a , b , c — емпіричні коефіцієнти, що визначаються за графіками осідань і числовими значеннями спостережених деформацій. Відхилення від прогнозованого тренду є важливою діагностичною ознакою.

Для встановлення оптимального інтервалу між циклами спостережень використовується критерій часу:

$$\Delta t \leq V_k / (2 \cdot m) \quad (2.7)$$

де m — середньоквадратична похибка одного вимірювання осідань, мм. Значення m визначається з повторних вимірювань:

$$m = \sqrt{(\sum v_i^2 / (n-1))} \quad (2.8)$$

При загальному інтервалі деформацій ΔS $n = 15-20$ мм і критичній швидкості $V_k = 10$ мм/міс, а також СКП нівелювання $m = 1-2$ мм, рекомендований інтервал між циклами спостережень становить не більше 2–3 місяців для верхніх горизонтів дамби в активній фазі заповнення. Така частота забезпечує своєчасне виявлення аномального прискорення деформацій і дозволяє вжити заходів до того, як ситуація стане критичною.

2.5 Методика визначення горизонтальних зміщень

Вимоги до точності вимірювань горизонтальних зсувів визначаються типом основи, на якій зведена споруда, та конструктивними особливостями самої дамби. Відповідно до нормативних вимог [45, 46], допустимі СКП визначення горизонтальних зсувів маркшейдерських геодезичних знаків (МГЗ) підпірних споруд хвостосховищ не мають перевищувати:

– $\pm 1,5$ мм — для споруд на скельній основі;

- $\pm 2\text{--}3$ мм — для споруд на слабостискуваних ґрунтах (модуль деформації $E > 2 \cdot 10^7$ Н/м²);
- ± 7 мм — для споруд на сильностискуваних ґрунтах ($E \leq 7,36 \cdot 10^6$ Н/м²) і для земляних дамб.

Для хвостосховища ПАТ «ІнГЗК», дамби якого зведені на суглинках і каолінах, допустима СКП визначення горизонтальних зсувів МГЗ приймається ± 7 мм. Вимірний зсув вважається достовірним, якщо його абсолютна величина перевищує подвоєне значення СКП: $|\Delta \text{МГЗ}| \geq 2\text{МД}$. Зсув у бік нижнього б'єфу умовно вважається позитивним, у бік верхнього — негативним. Для вимірювання горизонтальних зсувів застосовуються три методи: метод створів, метод прямої кутової засічки і комбінований метод.

2.5.1 Метод створу

Метод створів застосовується там, де вісь дамби є прямолінійною або близькою до прямолінійної — що характерно для більшості ділянок огорожувальних дамб хвостосховищ. Його суть полягає у фіксації відхилення контрольних марок від заданої прямої лінії (створу) між двома опорними реперами. Метод реалізується у двох варіантах: спосіб візування по створу і спосіб паралактичних кутів.

Спосіб візування по створу (рис. 2.1) дозволяє безпосередньо визначити відхилення МГЗ від створу без складних обчислень. На одному опорному репері (ОР) встановлюється геодезичний прилад, на протилежному — нерухома візирна марка. Вертикальна нитка інструменту наводиться на марку, після чого без повороту труби вимірюється відхилення від нитки рухомої марки на кожному МГЗ. Відстань між сусідніми марками приймається 100–150 м, що забезпечує задовільне оглядання й точність. Для спостережень застосовуються нівеліри з окулярними мікрометрами, аліметри (збільшення 45×, точність ± 1 мм при відстанях до 600 м), оптичні теодоліти Т1, Т2, Theo 010.

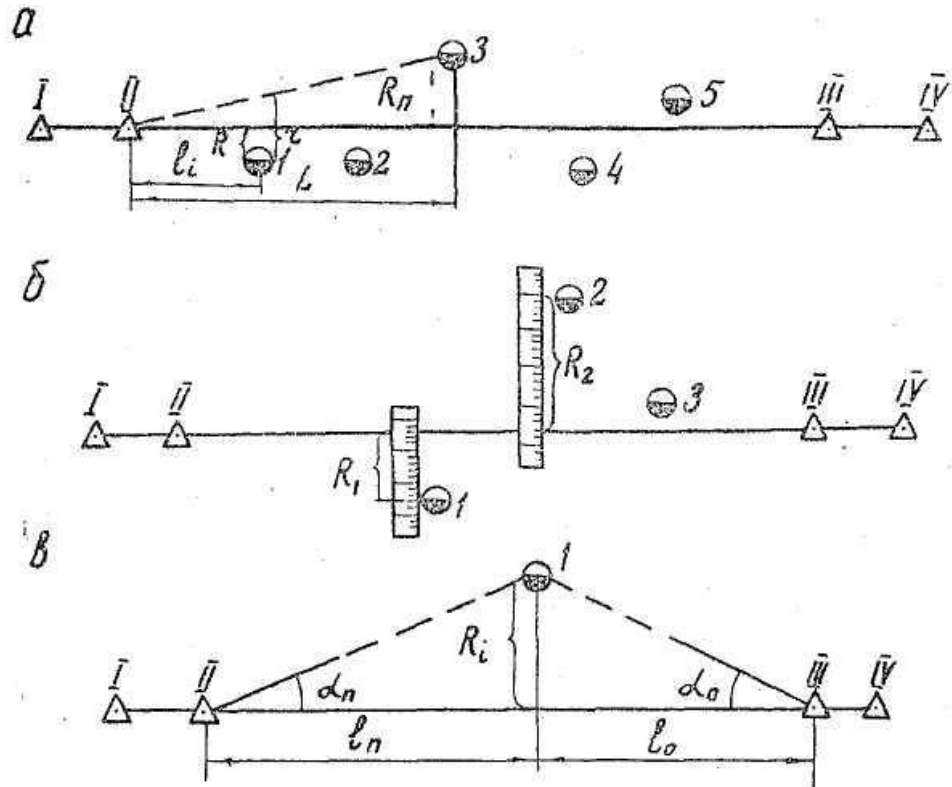


Рис. 2.1. Схема спостережень створним методом: а — розташування КВА на створі; б — спосіб візування по створу; в — спосіб паралактичних кутів

Спостереження виконуються двома прийомами, кожен з яких складається з двох напівприймів (при крузі ліворуч і крузі праворуч). Кількість відліків на кожній МГЗ обчислюється за формулою:

$$r = r_{np} + r_{зв} / 2 - MO \quad (2.9)$$

де MO — місце нуля рухомої марки.

Фактичне відхилення кожного МГЗ від лінії створу в даному циклі обчислюється з урахуванням положення проміжних марок:

$$\Delta i = r_i - (L_i / L) \cdot R_n \quad (2.10)$$

де r_i , R_n — середні відхилення відповідно даної МГЗ і кінцевої проміжної МГЗ від лінії між опорними реперами; L_i — відстань від ОР до даної МГЗ; L — повна довжина створу.

Горизонтальний зсув МГЗ між двома циклами вимірювань обчислюється як різниця відхилень від створу:

$$\Delta MГЗ = \Delta i(n) - \Delta i(n-1) \quad (2.11)$$

СКП визначення зсуву МГЗ від створу:

$$M\Delta = \sqrt{m^2(n) + m^2(n-1)} \quad (2.12)$$

де $m(n)$, $m(n-1)$ — СКП відхилення МГЗ від створу в поточному і попередньому циклах спостережень відповідно. СКП відхилення МГЗ від створу в одному циклі оцінюється з урахуванням похибки центрування інструменту $m_{ц}$:

$$m = \sqrt{m_{вим}^2 + m_{ц}^2} \quad (2.13)$$

Спосіб паралактичних кутів дозволяє обійтися без рухомих марок. Над кожним МГЗ і ОР встановлюються нерухомі марки, а теодолітом, встановленим на ОР, вимірюються паралактичні кути на всі МГЗ у прямому і зворотному напрямках. Паралактичний кут вимірюється 3–4 прийомами. Перевагою способу є незалежність від помічника і підвищена точність при великих відстанях, хоча він і є більш трудомістким. Відхилення МГЗ від створу обчислюється за:

$$\Delta i = d_i \cdot \operatorname{tg}(\delta i) \quad (2.14)$$

де d і — відстань від ОР до МГЗ; δ і — середній паралактичний кут. Горизонтальний зсув і СКП обчислюються за формулами (2.11) і (2.12). СКП відхилення МГЗ від створу в одному циклі при способі паралактичних кутів:

$$m = (d \text{ і} / \rho) \cdot m \delta \quad (2.15)$$

де $m \delta$ — СКП вимірювання паралактичного кута; $\rho = 206265''$. При довжині створу до 400–500 м і точності кутових вимірювань $m \delta = 1\text{--}2''$ спосіб паралактичних кутів забезпечує СКП визначення відхилення від створу на рівні $\pm 2\text{--}4$ мм.

2.5.2 Метод прямої кутової засічки

Метод прямої кутової засічки (рис. 2.2) застосовується тоді, коли топографічні умови або форма споруди унеможливають пряме візування по створу. У нижньому б'єфі дамби закладаються опорні репери А, В, С, з яких вимірюються кути на МГЗ, розташовані на різних горизонтах греблі. Місця закладки ОР вибираються так, щоб кути засічки були близькими до 90° , а відстані між ОР і МГЗ — якомога меншими. Оптимальним є рівнобедрений трикутник з кутом засічки $109^\circ 28'$, для якого похибка положення МГЗ є мінімальною.

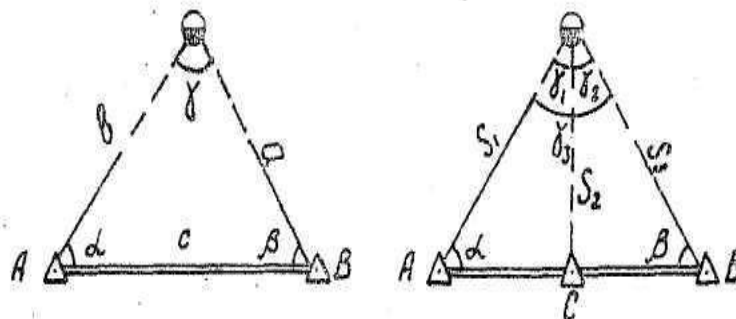


Рис. 2.2. Схема спостережень методом прямої кутової засічки

Вимірювання виконуються за тришативовою системою — теодолітами Т05, Т1 або Т2 — при суміжному наведенні на візирні марки, що встановлюються на кожному МГЗ і ОР за допомогою оптичних центрирів. Кути вимірюються способом кругових прийомів; граничні допуски для різних типів теодолітів наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Граничні допуски помилок кутових вимірювань при методі прямої засічки

Показник	Т05	Т1	Т2	Т5
Гранична похибка вимірювання кута за один прийом, «	±2	±4	±6	±10
Розбіжність між повними прийомами, «	4	6	8	15
Розбіжність між значеннями кута з двох напівприймів, «	3	5	8	13
Допустима колімаційна похибка, «	10	15	20	30

Відстань між опорними реперами (довжина базису) вимірюється лише в початковому циклі — двічі, з інтервалом 3–5 діб і відносною похибкою не гірше 1:2000. У подальших циклах довжина базису приймається незмінною. Положення ОР перевіряється кутовими вимірюваннями з пунктів тріангуляції не рідше одного разу на рік.

Координати МГЗ обчислюються рішенням прямої геодезичної задачі. Величина і напрямок зсуву МГЗ між циклами:

$$\Delta MГЗ = \sqrt{(\Delta X^2 + \Delta Y^2)} \quad (2.16)$$

де ΔX , ΔY — різниці координат МГЗ між поточним і попереднім циклами вимірювань.

Точність визначення положення МГЗ залежить від довжини базису c , кутів засічки β і точності вимірювання кутів M . При прийнятому базисі СКП положення МГЗ при простій засічці з одного базису:

$$M_{\text{МГЗ}} = M \cdot c / (\rho \cdot \sin^2 \beta) \quad (2.17)$$

При багатократній засічці (з n базисів) координати МГЗ отримують суворим зрівнюванням або як середнє значення із засічок з окремих базисів, а СКП оцінюється як:

$$M = \sqrt{(\sum m_i^2 / n)} \quad (2.18)$$

Перевага методу — можливість проведення вимірювань звичайними теодолітами без накладних рівнів. Недолік — більша трудомісткість порівняно з методом створу і необхідність залучення додаткового персоналу.

2.5.3 Комбінований метод

Більшість огорожувальних дамб великих хвостосховищ мають значну протяжність (кілька кілометрів), складну форму в плані з кутами повороту і підносяться над основою на десятки метрів. У таких умовах жоден із щойно розглянутих методів не є достатнім самотійно: метод створу неможливо застосувати на кривих ділянках, а метод засічки при великій довжині дамби вимагає надмірної кількості базисів і є надто трудомістким. Оптимальним рішенням є комбінований метод (рис. 2.3).

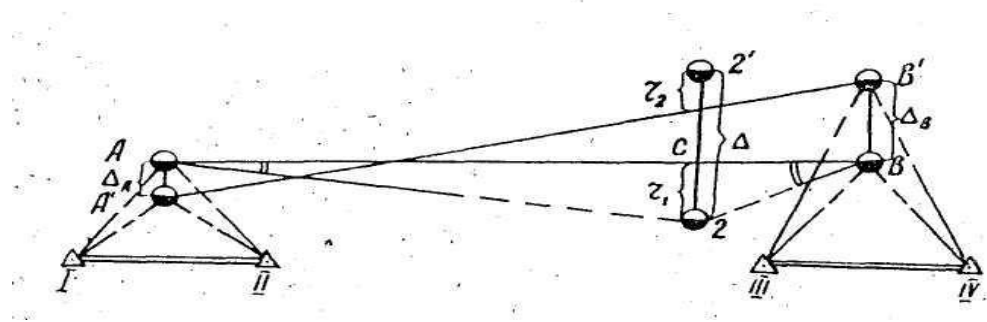


Рис. 2.3. Схема спостережень комбінованим методом

При комбінованому методі кінцеві МГЗ на прямолінійних ділянках дамби (А і В) визначаються прямою кутовою засічкою з базисів І–ІІ і ІІІ–ІV, розташованих у нижньому б'єфі. Проміжні МГЗ між А і В визначаються методом створу від лінії АВ. При зміщенні кінцевих марок між циклами виникає три можливих варіанти зміни положення лінії створу: одна з кінцевих марок зміщується при нерухомій другій; обидві зміщуються в одному напрямі; обидві зміщуються в протилежних напрямках. У кожному з цих випадків зсув проміжних МГЗ відносно вихідної лінії визначається за формулою:

$$\Delta i = r_2 - r_1 + (L i / L) \cdot (\Delta A - \Delta B) \quad (2.19)$$

де ΔA , ΔB — зсуви кінцевих марок А і В відповідно; r_2 , r_1 — відхилення МГЗ від лінії АВ у поточному і попередньому циклах; $L i$ — відстань від марки А до визначуваного МГЗ; L — відстань АВ. СКП визначення зсуву проміжного МГЗ:

$$M = \sqrt{(M^2 R + M^2 A + M^2 B)} \quad (2.20)$$

де $M R$ — СКП відхилення МГЗ від лінії АВ; $M A$, $M B$ — СКП визначення положення кінцевих марок А і В. Комбінований метод дозволяє

охопити спостереженнями весь периметр дамби хвостосховища при відносно невеликих витратах часу і людських ресурсів, що є суттєвою перевагою при обстеженні протяжних споруд.

2.6 Методика визначення вертикальних зміщень (осідань)

Вертикальні зміщення — осідання — є основним видом деформацій дамб хвостосховища на всіх горизонтах. Вони визначаються методом точного геометричного нівелювання по замкнених нівелірних ходах, прокладених між вихідним репером і пунктами КВА на кожному горизонті греблі. Клас нівелювання визначається нормативними вимогами: для споруд класу ССЗ вимірювання осідань виконуються за програмою не нижче III класу з граничною похибкою не більше 2 мм.

Для вимірювань застосовуються прецизійні електронні нівеліри, наприклад Trimble DINI 0.3 або аналогічні, у комплекті з штрих-кодovими рейками. Такі прилади забезпечують СКП нівелювання $\pm 1,0$ мм/км подвійного ходу, що цілком достатньо для виконання нівелювання III класу на ділянках довжиною до кількох кілометрів. Нівелювання виконується в прямому і зворотному напрямках; фактична нев'язка ходу порівнюється з допустимою:

$$fh_{\text{доп}} = \pm 10\sqrt{L} \text{ мм} \quad (2.21)$$

де L — довжина нівелірного ходу, км. Допустиме значення нев'язки для III класу нівелювання. При менших нев'язках результати вимірювань є кондиційними і приймаються для подальшого оброблення. При перевищенні допуску хід повторюється.

Вихідні репери для висотних спостережень закладаються за межами зони можливих деформацій на стабільних основах — у скельних виходах або у свердловинах, пробурених нижче шару сезонного промерзання і заглиблених у тверді породи. На хвостосховищі «Східна карта» вихідним є

піраміда «Rp 13»; для «Західної карти» — піраміда «Баба». Стабільність вихідних реперів перевіряється порівнянням їх відміток між суміжними циклами спостережень.

Осідання кожного пункту КВА між циклами n і $n-1$ визначається як:

$$\Delta H_n = H(n-1) - H_n \quad (2.22)$$

де H_n , $H(n-1)$ — висотні відмітки пункту відповідно у поточному і попередньому циклах. Знак «плюс» означає осідання (зниження позначки), знак «мінус» — підняття (що трапляється значно рідше і може бути ознакою нерівномірного розподілу фільтраційного тиску). За накопиченим рядом спостережень для кожного пункту будуються графіки динаміки осідань у часі, які є основним інструментом аналізу стану дамби.

Швидкість осідання обчислюється між суміжними циклами за формулою (2.4). Допустимий діапазон швидкостей для пунктів КВА на греблях хвостосховища у нормальному режимі — $1 < V_t < 10$ мм/міс (0,03–0,33 мм/добу). Вихід за верхню межу цього діапазону є підставою для оперативного аналізу причин і, за необхідності, позачергового циклу вимірювань. Вищі швидкості осідань закономірно спостерігаються на верхніх горизонтах дамби, де консолідація намівних порід ще не завершена.

2.7 Закладка реперів та станцій спостереження

Ефективність геодезичного моніторингу в значній мірі залежить від правильності конструкції і місць закладки контрольних реперів. Репер має передавати деформації ґрунту або споруди без спотворень, зберігати стабільність протягом усього терміну спостережень і забезпечувати зручність проведення вимірювань. Ці, здавалося б, прості вимоги на практиці часто виявляються суперечливими: репер, глибоко заглиблений для стабільності, може бути незручним для нівелювання, а поверхнева конструкція, зручна для вимірювань, схильна до виморожування і механічних пошкоджень.

Станція спостереження складається з кількох профільних ліній реперів, що закладаються перпендикулярно до осі дамби на різних горизонтах — гребені, бермах і основі. Вимоги до закладки реперів:

- а) опорні реperi повинні розташовуватись поза зоною можливих деформацій і на відстані не менше висоти дамби від її гребеня (по поверхні) і не менше 100 м — від основи дамби;
- б) прив'язка опорних реперів профільних ліній виконується до точок опорної геодезичної мережі з точністю, що відповідає точності пунктів цієї мережі;
- в) відстань між робочими реперами вздовж профільної лінії не повинна перевищувати половини ширини кроку намиву (заходки); на гребені дамби — не більше 50–100 м;
- г) конструкція репера повинна забезпечити жорсткий зв'язок з ґрунтом, стійкість до морозного здуття і можливість точного центрування приладу.

Схема розміщення опорних і робочих реперів профільної лінії наведена на рис. 2.4. Протяжність частини профільної лінії від краю дамби до першого опорного репера має бути не менше $1,5H$, де H — висота дамби.

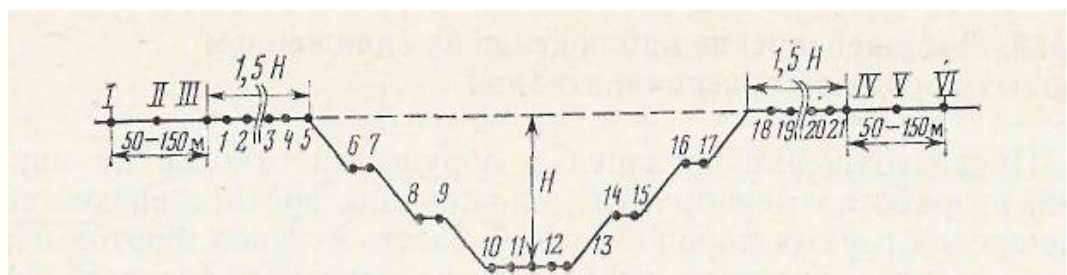


Рис. 2.4. Схема розташування опорних (I, II, III) і робочих (1, 2, 3) реперів профільної лінії станції спостереження

Глибина закладки репера визначається з умови розміщення його якірної частини нижче шару сезонного промерзання:

$$H = h_{\max} + a + b \quad (2.23)$$

де $h_{\max}$ — максимальна глибина промерзання ґрунту в даному районі, м; a — висота бетонного якоря репера (0,2–0,5 м); b — запас з урахуванням похибки визначення глибини промерзання і можливої пористої підоснови (0,2 м). Для Криворізького регіону, де глибина промерзання сягає 0,8–1,0 м, мінімальна глибина закладки опорних реперів становить приблизно 1,3–1,5 м від поверхні.

Опорні реperi в звичайних умовах закладаються у пробурених свердловинах або котлованах. Корпус репера (стрижень з прутка або товстостінної труби діаметром 25–30 мм, довжиною 1,5–2,0 м) встановлюється у свердловину, нижня частина якої заповнюється бетоном (200–300 мм), а верхня — піщаним або шлаковим засипанням для зменшення тертя ґрунту об корпус при морозному здутті. Типові конструкції опорних реперів для різних умов наведені на рис. 2.5.

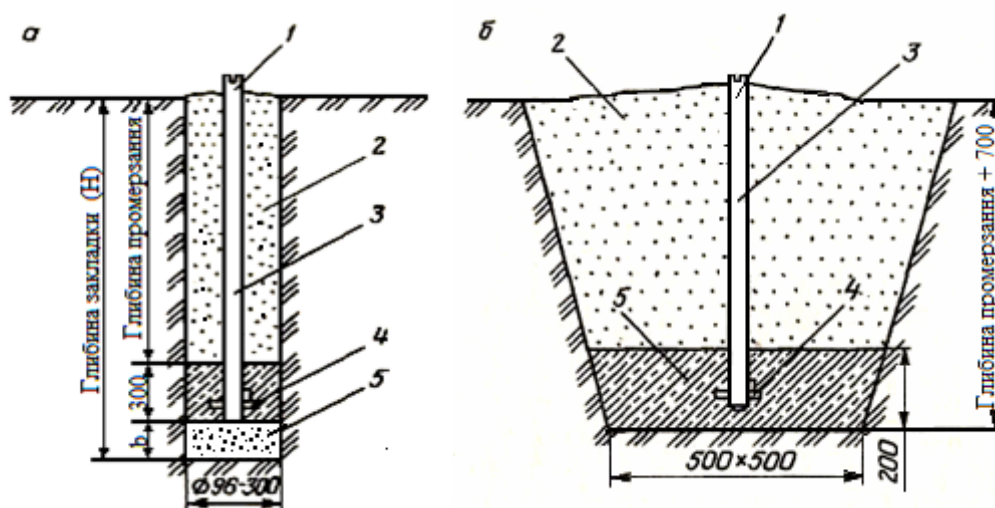


Рис. 2.5. Типи опорних реперів: а — закладений у свердловині; б — закладений у котловані

Для захисту від механічних пошкоджень і атмосферних впливів навколо репера бетонується майданчик або пілон розміром 700×700 мм і

завтовшки 200 мм, при цьому між бетоном і корпусом репера обов'язково передбачається ізоляційна прокладка (толь, промаслена ганчірка), щоб температурні деформації бетону не передавались на репер. Верхня частина репера заглиблюється на 50–70 мм нижче верху пілона для захисту від пошкоджень.

Робочі реperi можуть мати спрощену конструкцію. Для звичайних умов застосовуються забивні реperi з бурової сталі або арматури діаметром 20–25 мм і довжиною 1,5–2,0 м; нижній кінець зазубрюється для кращого зчеплення з ґрунтом. У випадку можливого виморожування використовуються реperi спеціальної конструкції з центральним стрижнем, що дозволяє фіксувати величину сезонного випучення і вводити відповідну поправку у висотні спостереження. Типи робочих реперів для різних умов закладки показані на рис. 2.6.

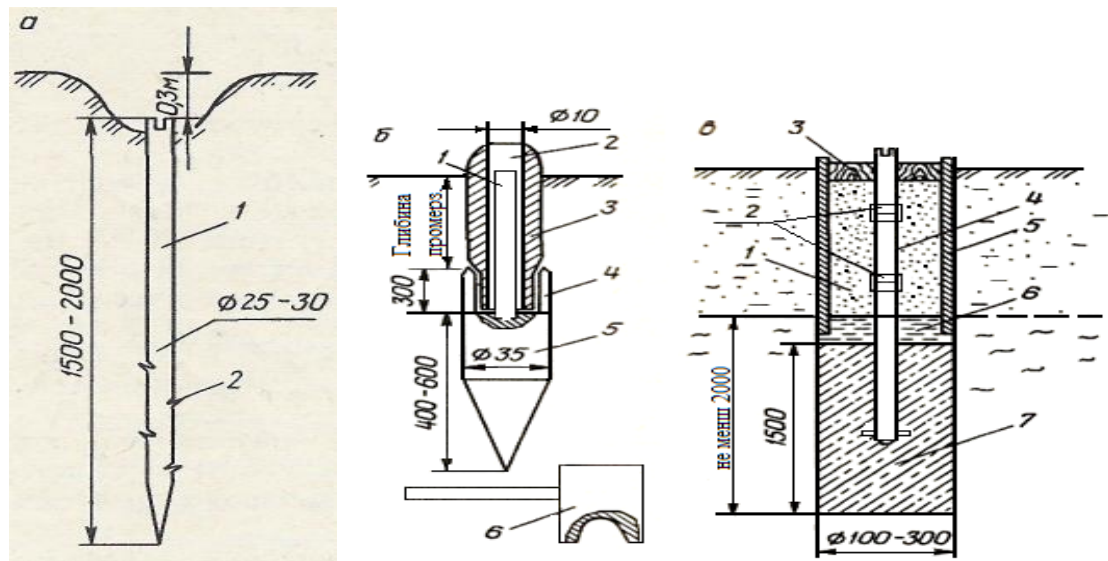


Рис. 2.6. Типи робочих реперів: а — забивний у звичайному ґрунті; б — забивний в умовах виморожування; в — у свердловині для заболоченої місцевості

У скельних породах реperi закладаються у пробурених свердловинах і закріплюються за допомогою бетонного якоря у неушкоджених, монолітних породах. У зруйнованих і роздроблених породах необхідне обсадження свердловини. У багаторічно-мерзлих ґрунтах (які в умовах Криворіжжя не

зустрічаються, але характерні для північних регіонів) свердловину бурять нижче за глибину сезонного відтавання, а в ній встановлюють обсадну трубу, від'єднану від якоря, щоб сезонні рухи ґрунту не передавались на репер. Відповідні конструкції показані на рис. 2.7.

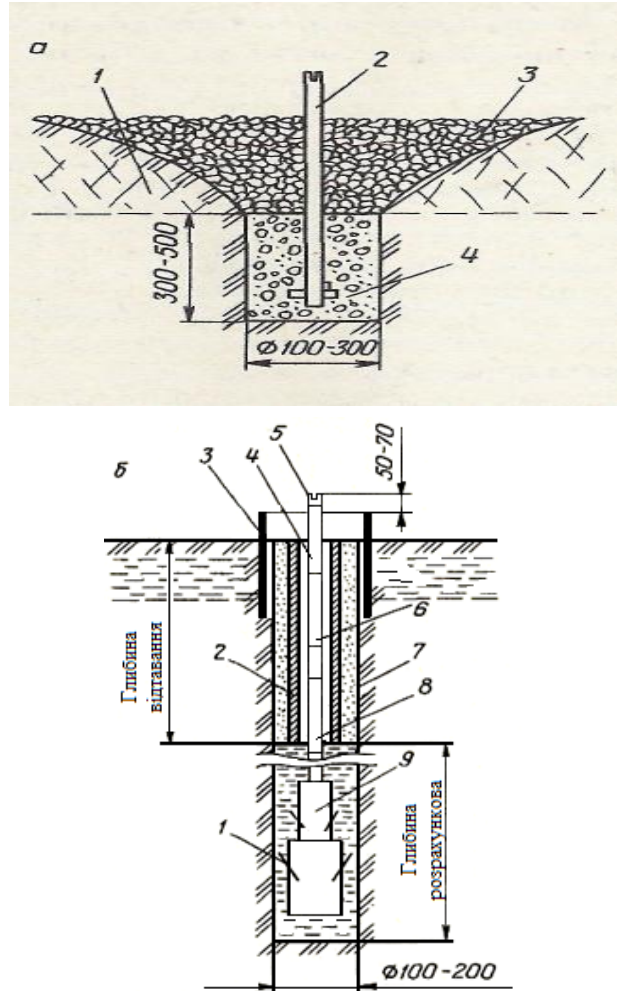


Рис. 2.7. Типи реперів для особливих умов: а — для скельних порід; б — для багаторічно-мерзлих ґрунтів

У ситуаціях, коли персонал геодезичної служби не може безпечно наблизитись до репера — наприклад, у зоні очікуваного обвалення або в зоні активного наміву — застосовуються реperi для дистанційного визначення зрушень. Їх верхня частина оснащується укосинами і хрестовиною для кріплення дротяних зв'язків, що виводяться за межі небезпечної зони. Зміна натягу дроту фіксує горизонтальне зміщення репера без необхідності наближення до нього (рис. 2.8).

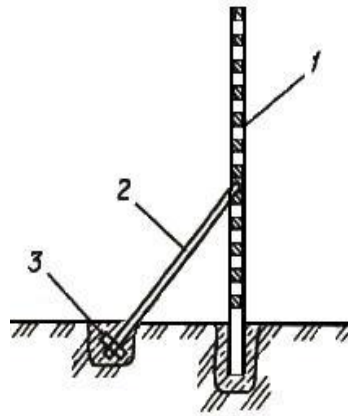


Рис. 2.8. Тип репера для дистанційного визначення зрушень за допомогою дротяних зв'язків

Для спостережень у зонах очікуваного обвалення поверхні над підробленими ділянками застосовуються спеціальні конструкції реперів (рис. 2.9), що дозволяють фіксувати максимальні значення вертикальних зрушень безпосередньо перед обваленням. Такі реperi застосовні тільки на рівних ділянках місцевості.

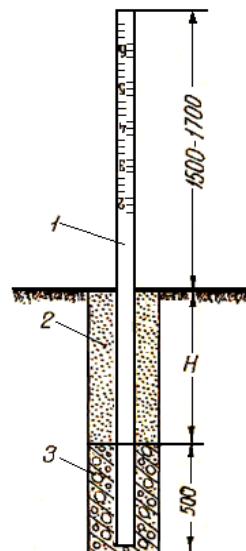


Рис. 2.9. Тип репера, що закладається в зоні очікуваного обвалення земної поверхні

Після закладки всіх реперів складається детальний абрис їх розміщення відносно постійних орієнтирів і вихідних реперів, а також виноситься план

станції спостереження у масштабі 1:1000 або 1:2000. На плані показується стан гірничих робіт на момент закладки, проект подальшого їх розвитку, споруди у зоні впливу, схема профільних ліній і рельєф місцевості. До плану додаються геологічні розрізи з показом меж літологічних відмінностей, тектонічних порушень, характеристик міцності ґрунтів (кут внутрішнього тертя ρ і зчеплення K).

На станціях спостереження виконуються нівелювання всіх реперів і вимірювання відстаней між ними вздовж профільних ліній. Інтервали між циклами встановлюються індивідуально залежно від швидкості деформацій: при активному наміві і значних деформаціях — щоденно; при стабільному стані і малих деформаціях — раз на квартал. Проект станції спостереження погоджується з проектною організацією і затверджується технічним керівником підприємства.

ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ

Розгляд методики геодезичних спостережень за деформаціями споруд хвостосховища дозволяє зробити такі висновки:

- 1) Хвостове господарство ПАТ «ІнГЗК» є складним технічним комплексом, огорожувальна дамба якого має кам'яно-накидну конструкцію з суглинковим екраном. Конструктивні особливості дамби — висота до 88 м, протяжність 5040 м, наявність берм і кількох горизонтів КВА — визначають специфічні умови організації геодезичного моніторингу.
- 2) Деформації дамби включають вертикальну (осідання) і горизонтальну (зсуви) складові. Для приблизної оцінки осідання гребеня використовується формула Лаутона і Лестера. Нормативний діапазон швидкостей осідань при консолідаційних процесах — 1–10 мм/міс; вихід за верхню межу є підставою для вжиття оперативних заходів.

- 3) Натурні спостереження поділяються на обов'язкові (геодезичний контроль деформацій, фільтраційний і гідрологічний моніторинг) та спеціальні. Мінімальна частота геодезичних спостережень на верхніх горизонтах — 4 цикли на рік; нижніх — 1 цикл на рік.
- 4) Безпечний стан дамби оцінюється за двома критеріями: інтенсивності деформації ($0 \leq V_t \leq V_k = 10 \text{ мм/міс}$) і допустимої величини (S_t у межах проектного значення $\pm 15\text{--}20 \text{ мм}$). Оптимальний інтервал між циклами визначається через критерій часу з урахуванням СКП нівелювання і критичної швидкості деформацій.
- 5) Горизонтальні зміщення визначаються методами створу, прямої кутової засічки і комбінованим. Для огорожувальних дамб хвостосховища ПАТ «ІнГЗК» як основний рекомендується комбінований метод, що поєднує переваги обох: метод засічки для кінцевих марок на прямолінійних ділянках і метод створу для визначення проміжних. Допустима СКП визначення горизонтальних зсувів $\pm 7 \text{ мм}$.
- 6) Вертикальні зміщення визначаються нівелюванням III класу по замкнених ходах від вихідних пірамід «Рр 13» і «Баба» з СКП не гірше $\pm 1,0 \text{ мм/км}$ подвійного ходу. Конструкція і глибина закладки реперів визначається умовами ґрунту і кліматичними характеристиками (глибина промерзання, обводненість основи).

РОЗДІЛ 3 ГЕОДЕЗИЧНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА ДЕФОРМАЦІЯМИ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ СПОРУД ХВОСТОСХОВИЩА ПАТ «ІНГЗК»

3.1 Мережа контрольно-вимірювальної апаратури та організація спостережень

Хвостосховище ПАТ «ІнГЗК» (рис. 3.1) входить до переліку потенційно небезпечних об'єктів, на яких відповідно до чинних нормативних документів обов'язковим є систематичний інструментальний контроль деформаційних процесів. Жодний візуальний огляд чи локальний датчик не здатні замінити геодезичне спостереження, бо саме воно дає кількісну картину зміщень по всьому периметру дамби одночасно. Цю функцію виконує мережа контрольно-вимірювальної апаратури (КВА) — система ґрунтових реперів, закладених у тілі греблі по горизонтах (ярусах).

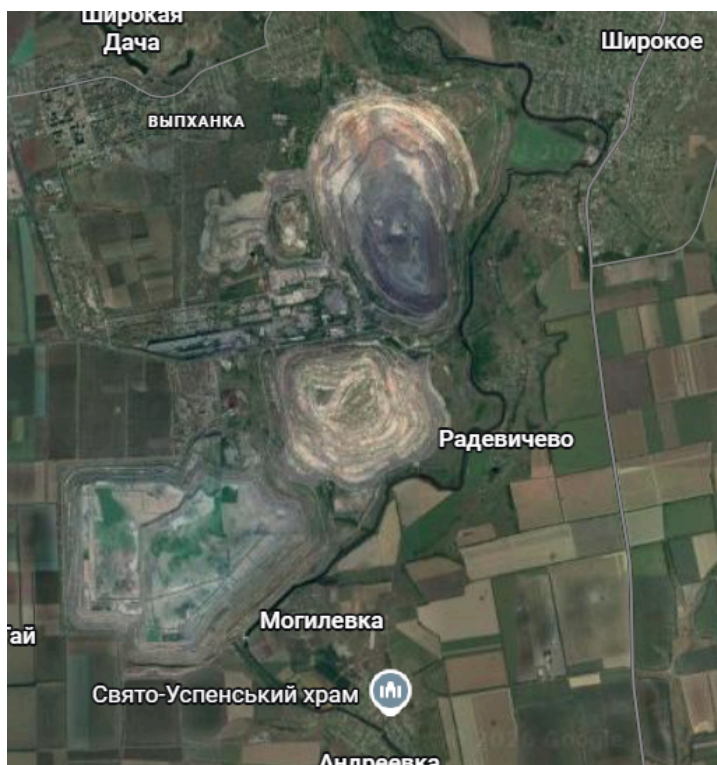


Рис. 3.1. Хвостосховище ПАТ «Інгулецького гірничо-збагачувального комбінату»

Спостереження за деформаціями дамби хвостосховища ПАТ «ІнГЗК» у 2015 році виконувались відділом спеціальних маркшейдерсько-геодезичних досліджень Дочірнього підприємства «УкрРудПром» асоціації «Укррудпром»

відповідно до договору № 2059-05 від 01.04.2015 р. Мета — забезпечення безпечної експлуатації хвостосховища шляхом систематичного визначення просторових координат пунктів КВА на різних ярусах греблі та аналізу їх зміщень у часі. Камеральне оброблення польових даних виконувалось у програмному комплексі CREDO (фірма «Credo-Dialogue»).

Мережа КВА охоплює дві ділянки хвостосховища — греблі «Східна карта» і «Західна карта» (рис. 3.2). На «Східній карті» пункти КВА розміщені на горизонтах 13, 14, 15, 16, 17 і нижчих горизонтах (нижче гор. 13). На «Західній карті» — на трьох горизонтах: +99, +105 і +112,5 м. Загальна кількість пунктів КВА, охоплених спостереженнями у 2015 р., перевищує 90 реперів.



Рис. 3.2. Загальна схема розташування пунктів КВА на греблях хвостосховищ «Східна карта» і «Західна карта»

Програма спостережень передбачала: на «Східній карті» — 4 цикли GPS- і нівелірних вимірювань на гор. 13, 14, 15, 17 протягом 2015 р. і 1 щорічний цикл на нижніх горизонтах та на гор. 16; на «Західній карті» — 4 цикли GPS-вимірювань і нівелювання на гор. +99, +105 і +112,5 м. Вихідним пунктом для GPS-вимірювань і нівелювання на «Східній карті» є піраміда «Рр 13»; для нівелювання на «Захід карті» — піраміда «Баба». Обидва пункти

розташовані поза зоною можливих деформацій і визнані стабільними за результатами міжциклового порівняння.

3.2 Планово-висотні визначення положення пунктів КВА

3.2.1 Характеристика GPS-вимірювань та оцінка їх точності

Планове та висотне положення всіх пунктів КВА визначалось методом відносних GPS-спостережень у статичному режимі. У 2015 р. для цього застосовувались двочастотні GPS/GLONASS-приймачі Topcon GR-5 (США) — на той момент один із кращих серед доступних геодезичних GNSS-приймачів. Прилад підтримував дві супутникові системи — GPS і GLONASS — і мав 72 канали відстеження. Паспортна точність у статичному режимі: у плані $\pm 3 \text{ мм} + 0,5 \text{ ppm}$, по висоті $\pm 6 \text{ мм} + 0,5 \text{ ppm}$ від базової лінії.

Слід зазначити, що з часу проведення спостережень геодезичне GNSS-обладнання суттєво еволюціонувало. Сучасні приймачі — Trimble R12i, Leica GS18 Ti, Topcon HiPer HR — відстежують чотири супутникові системи (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) і мають від 226 до 672 каналів, що принципово змінює умови і якість спостережень. Порівняльна характеристика обладнання 2015 р. та сучасних аналогів наведена у табл. 3.4. Ця порівняльна таблиця дозволяє оцінити прогрес галузі за десять років і обґрунтувати необхідність оновлення парку обладнання при подальшому моніторингу.

Таблиця 3.4 – Порівняльна характеристика GNSS-приймачів 2015 р. та сучасних аналогів

Параметр	Topcon GR-5(2015 р.)	Trimble R12i(актуальний)	Leica GS18 Ti(актуальний)	Topcon HiPer HR(актуальний)
Супутникові системи	GPS + GLONASS (2)	GPS + GLONASS +	GPS + GLONASS +	GPS + GLONASS +

		Galileo + BeiDou (4)	Galileo + BeiDou (4)	Galileo + BeiDou (4)
Кількість каналів	72	672	555	226
Точність у плані (статика)	$\pm 3 \text{ мм} + 0,5 \text{ ppm}$	$\pm 3 \text{ мм} + 0,1 \text{ ppm}$	$\pm 2 \text{ мм} + 0,4 \text{ ppm}$	$\pm 3 \text{ мм} + 0,5 \text{ ppm}$
Точність по висоті (статика)	$\pm 6 \text{ мм} + 0,5 \text{ ppm}$	$\pm 3,5 \text{ мм} + 0,4 \text{ ppm}$	$\pm 4 \text{ мм} + 0,4 \text{ ppm}$	$\pm 5 \text{ мм} + 0,5 \text{ ppm}$
Точність у плані (RTK)	$\pm 8 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$	$\pm 8 \text{ мм} + 0,5 \text{ ppm}$	$\pm 6 \text{ мм} + 0,5 \text{ ppm}$	$\pm 10 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$
Типова к-ть видимих супутників	11–17	20–35	20–35	18–30
PDOP при нормальних умовах	1,5–2,0	< 1,2	< 1,2	< 1,4
Підтримка NTRIP/RTK-мере жі	обмежена	так	так	так
Захист (IP)	IP67	IP67	IP68	IP67

Як видно з табл. 3.4, ключовою відмінністю сучасних приймачів є підтримка чотирьох супутникових систем замість двох. Це принципово важливо для умов хвостосховища: дамба заввишки 88 м з крутими укосами створює значні перешкоди для прийому сигналів. Якщо у 2015 р. кількість видимих супутників становила 11–17 (лише GPS і GLONASS), то сучасні приймачі при тих само умовах відстежували б 20–35 супутників з усіх чотирьох систем. Відповідно геометричний чинник PDOP знижується з 1,5–2,0 до значень менше 1,2, що прямо підвищує точність визначення координат.

Що стосується точності безпосередньо виконаних у 2015 р. спостережень, вона є цілком достатньою. При відстані від Rр13 до пунктів

КВА від 600 до 4100 м похибка від масштабного множника 0,5 ppm не перевищує ± 2 мм, тож реальна точність у плані становить $\pm 3\text{--}4$ мм, по висоті $\pm 6\text{--}7$ мм. Це відповідає нормативним вимогам до мереж трилатерації 1 розряду.

Зйомка пунктів КВА «Східної карти» на горизонтах нижче 13 виконувалась у липні 2015 р. протягом трьох днів. Схеми розташування пунктів, задіяних у кожний день зйомки, наведені на рис. 3.3–3.7.

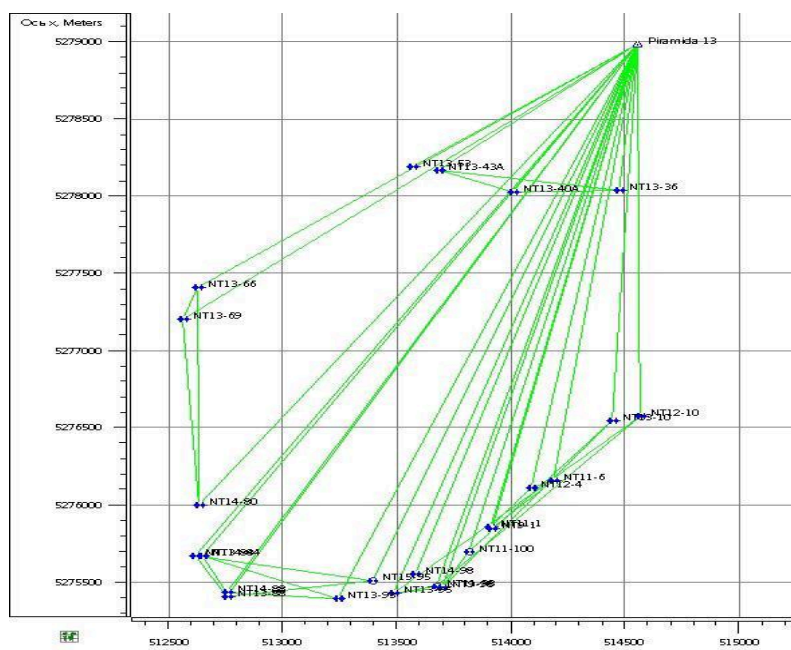
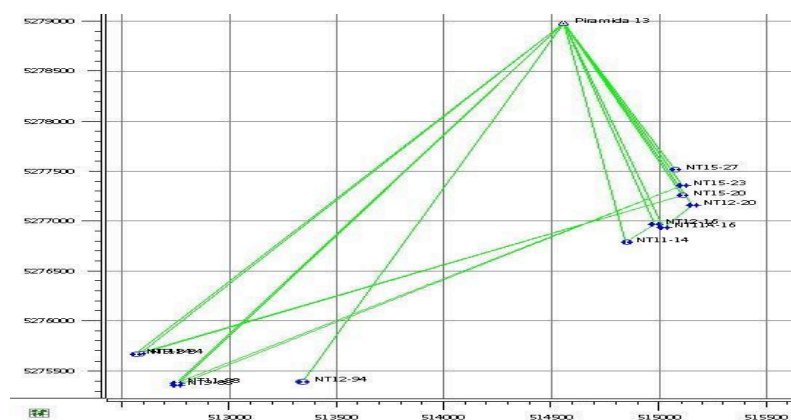


Рис. 3.3. Схема розташування пунктів КВА на греблі «Східна карта» (горизонти нижче 13),
1-й день зйомки



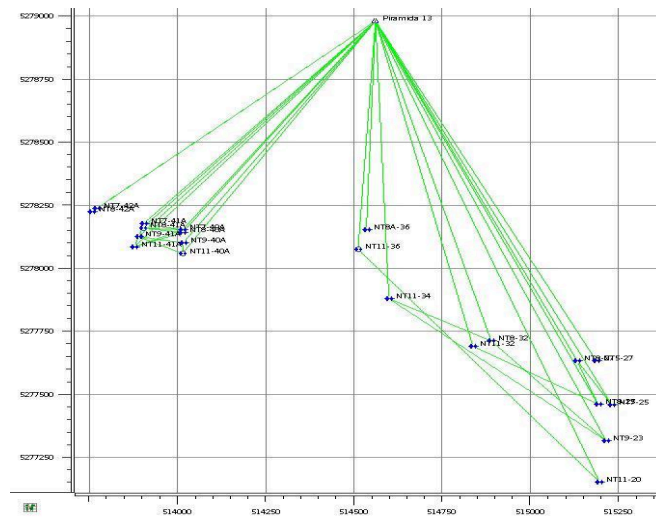


Рис. 3.5. Схема розташування пунктів КВА на греблі «Східна карта» (горизонти нижче 13),
3-й день зйомки

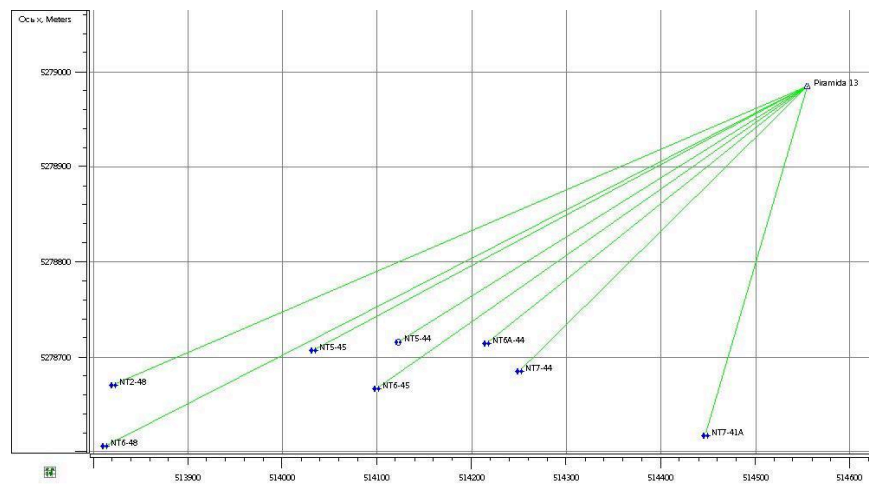


Рис. 3.6. Схема розташування додаткових пунктів КВА на греблі «Східна карта»
(горизонти нижче 13)

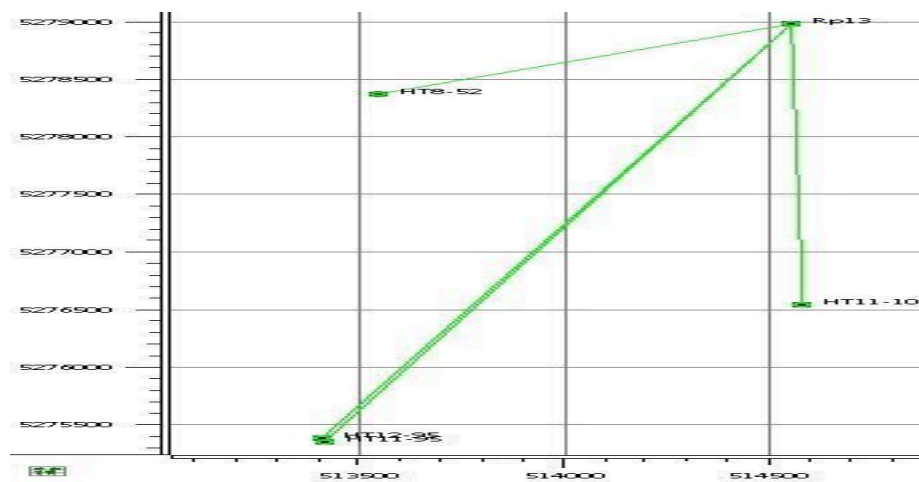


Рис. 3.7. Зведена схема розташування пунктів КВА на греблі «Східна карта» (горизонти
нижче 13)

Проекції траєкторій супутників на небесну сферу і графіки зміни кількості супутників та коефіцієнта PDOP під час кожного сеансу зйомки наведені на рис. 3.8–3.12. Кількість одночасно відстежуваних супутників становила 11–17, PDOP не перевищував 2,0. Порівняно із сучасними чотирисистемними приймачами це менш сприятливі умови, однак вони повністю відповідають вимогам до спостережень статичним методом і забезпечують надійне визначення координат з точністю мереж 1 розряду.

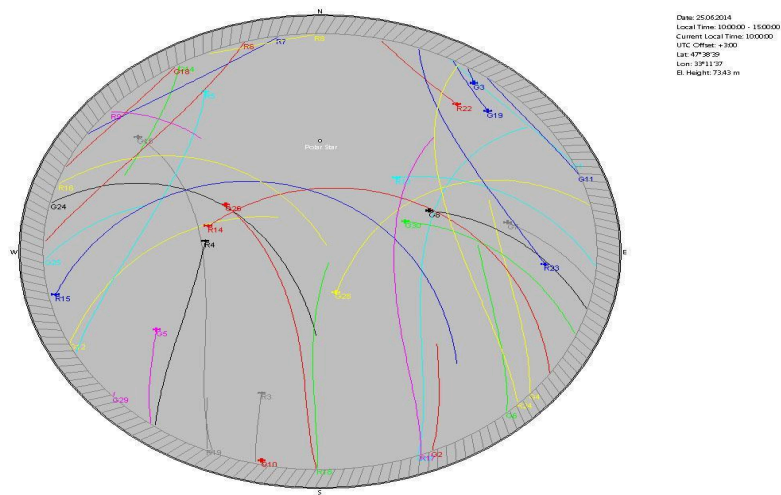


Рис. 3.8. Проекції траєкторій супутників на небесну сферу (горизонти нижче 13, 1-й день)

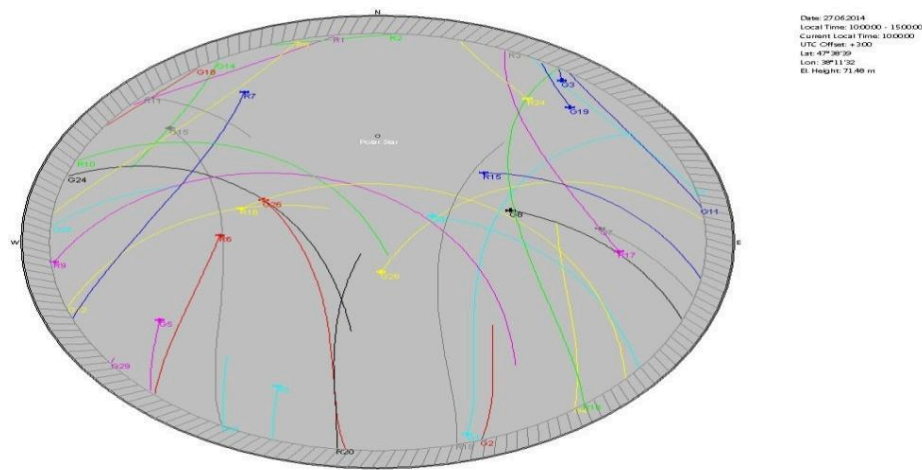


Рис. 3.9. Проекції траєкторій супутників на небесну сферу (горизонти нижче 13, 2-й день)

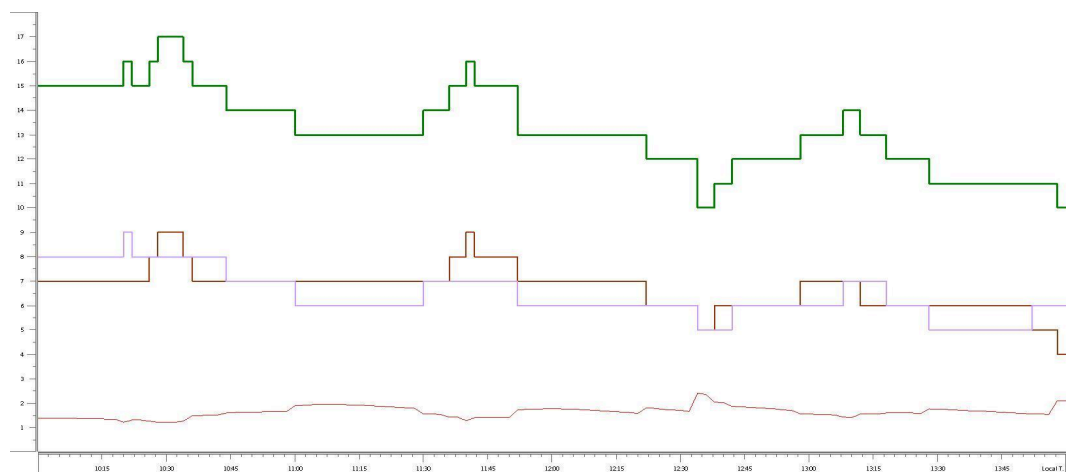


Рис. 3.10. Графіки кількості супутників і PDOP, 1-й день зйомки

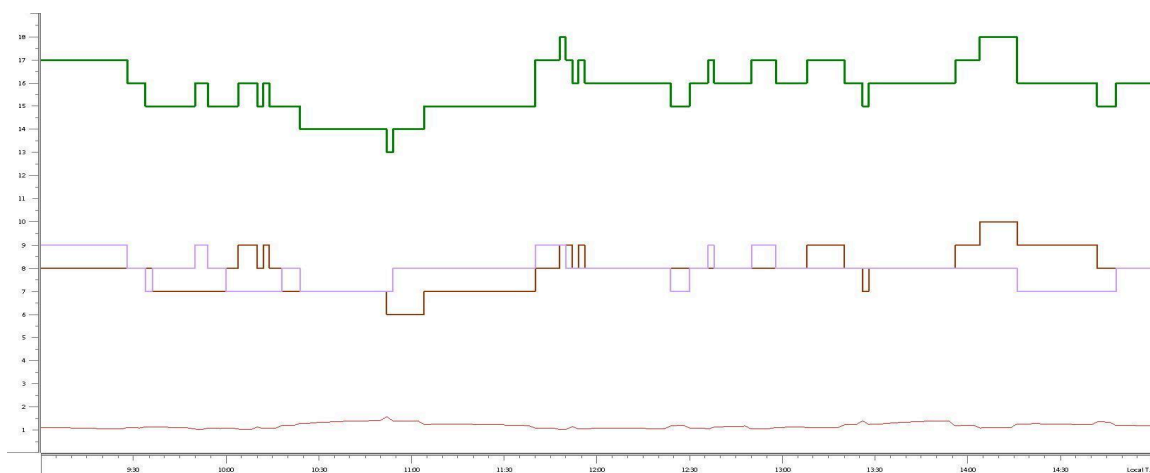


Рис. 3.11. Графіки кількості супутників і PDOP, 2-й день зйомки

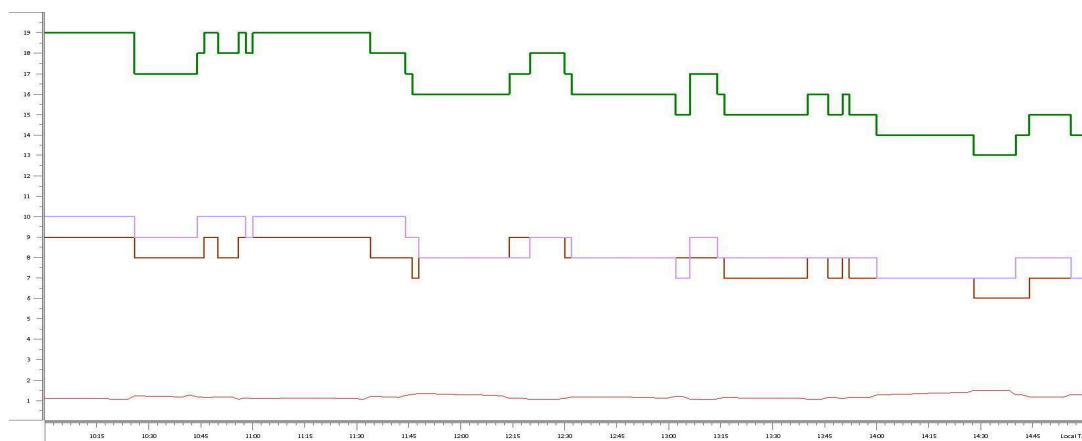


Рис. 3.12. Графіки кількості супутників і PDOP, 3-й день зйомки

Спостереження на пунктах КВА горизонтів 13, 14, 15, 17 «Східної карти» виконувались протягом двох днів (рис. 3.13–3.19). Умови спостережень були аналогічними: кількість супутників 11–17, $PDOP \leq 2,0$.

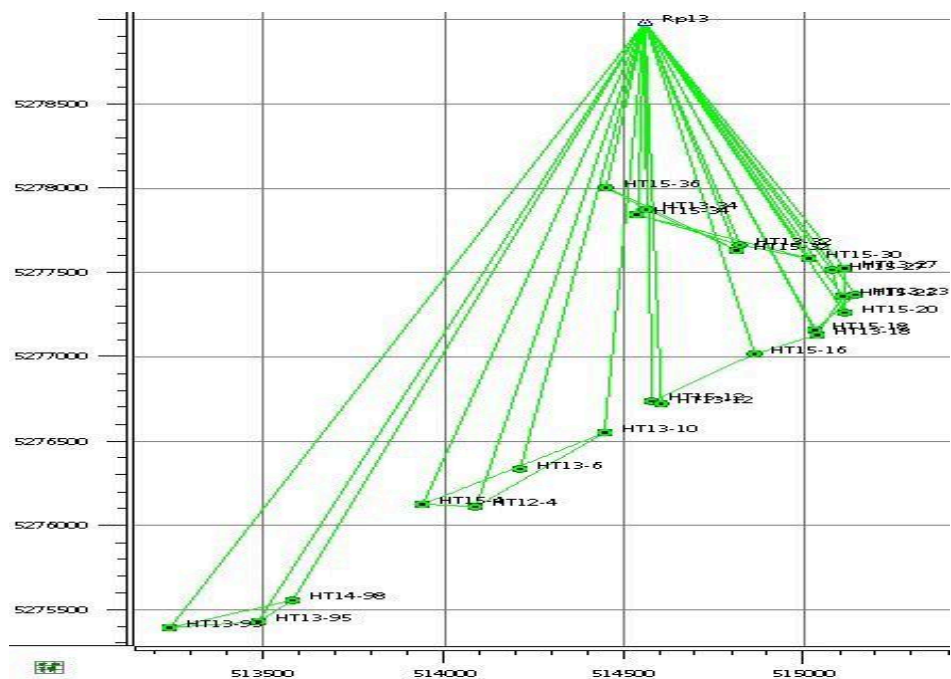


Рис. 3.13. Схема пунктів КВА «Східна карта» (гор. 13, 14, 15, 17), 1-й день

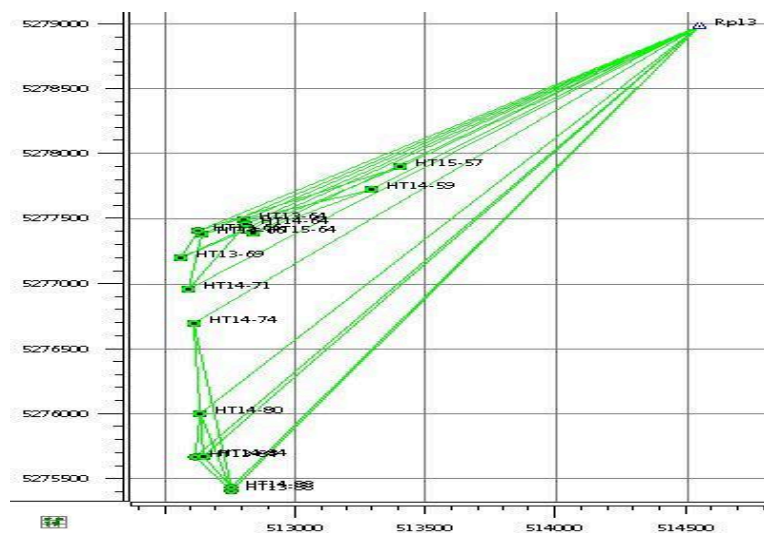


Рис. 3.14. Схема пунктів КВА «Східна карта» (гор. 13, 14, 15, 17), 2-й день

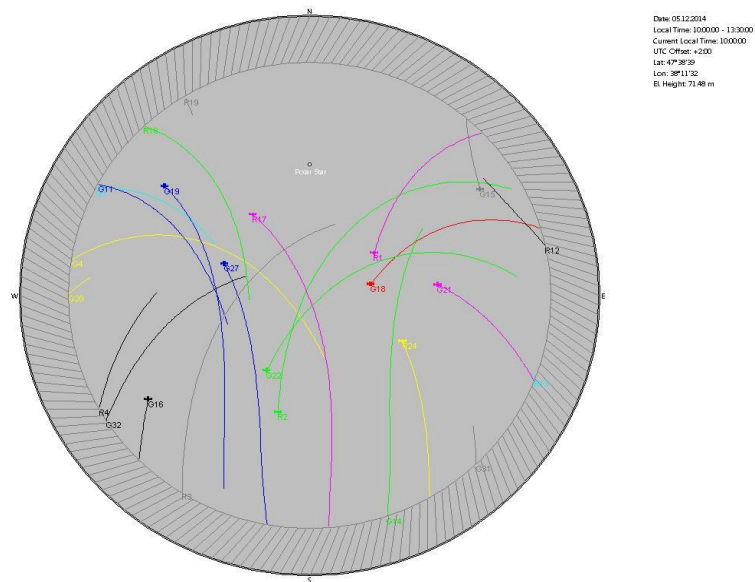


Рис. 3.17. Проекції траєкторій супутників, «Східна карта» (гор. 13–17), 2-й день

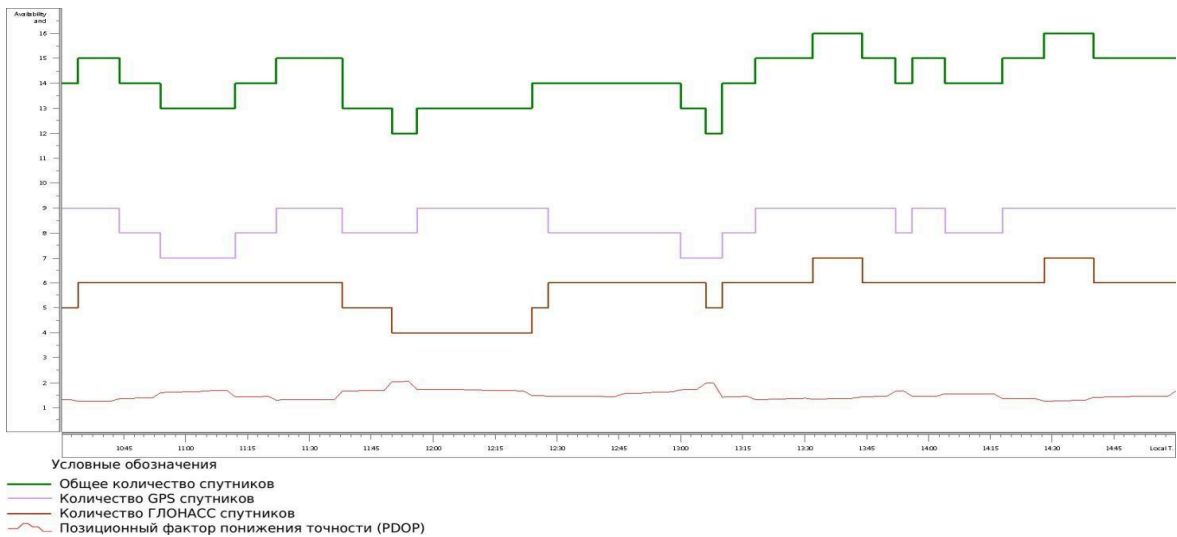


Рис. 3.18. Графіки кількості супутників і PDOP, «Східна карта» (гор. 13–17), 1-й день

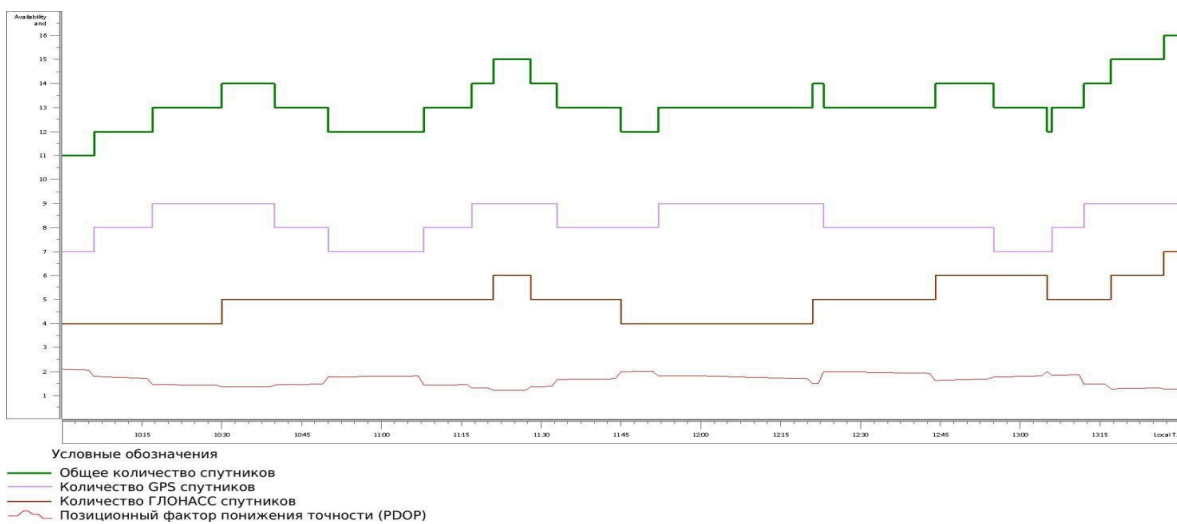


Рис. 3.19. Графіки кількості супутників і PDOP, «Східна карта» (гор. 13–17), 2-й день

Спостереження на «Західній карті» (гор. +99, +105, +112,5 м) виконувались двома днями. Кількість супутників — 11–20, PDOP $\leq 2,0$. Відкритіший горизонт на верхніх горизонтах дамби сприяв кращій супутниковій геометрії порівняно зі «Східною картою». Схеми пунктів і характеристики зйомки наведені на рис. 3.20–3.24.

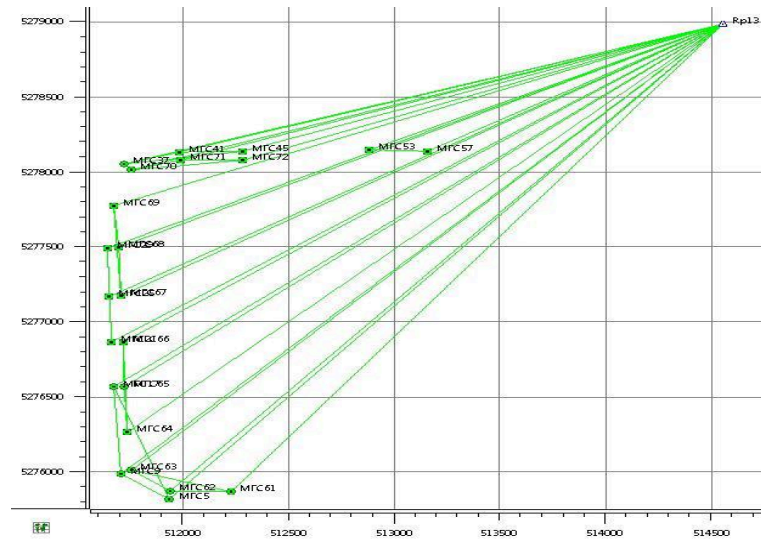


Рис. 3.20. Схема пунктів КВА на греблі «Західна карта», 1-й день

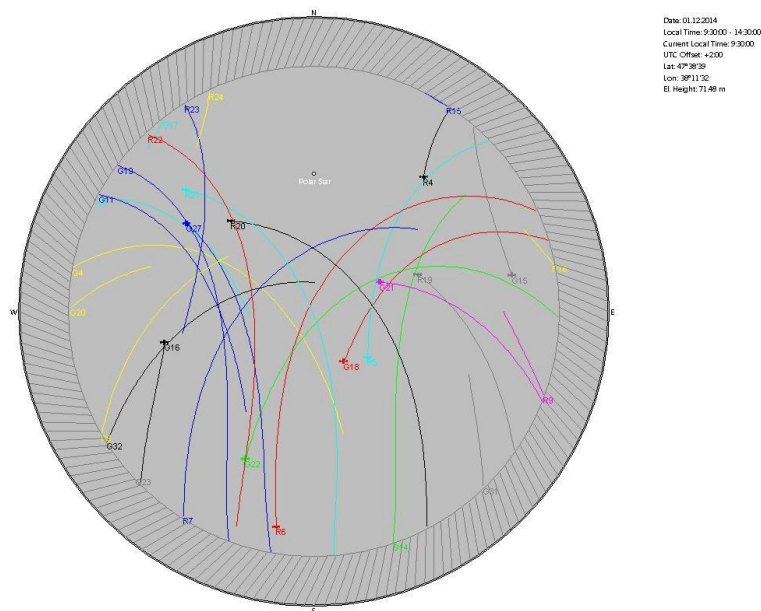


Рис. 3.21. Проекції траєкторій супутників, «Західна карта», 1-й день

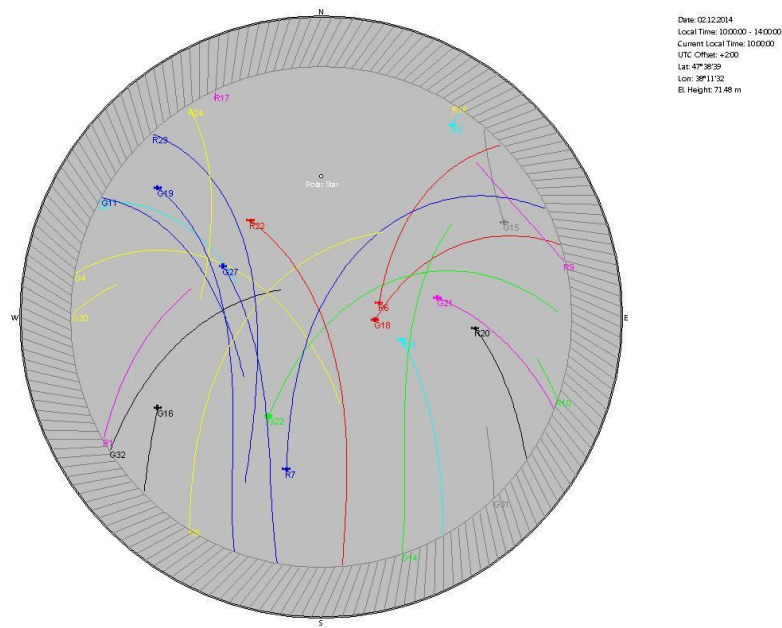


Рис. 3.22. Проекції траєкторій супутників, «Західна карта», 2-й день

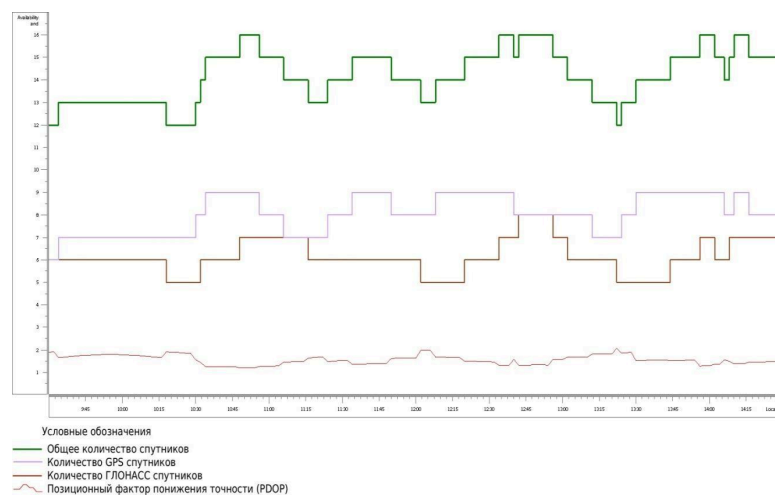


Рис. 3.23. Графіки кількості супутників і PDOP, «Західна карта», 1-й день

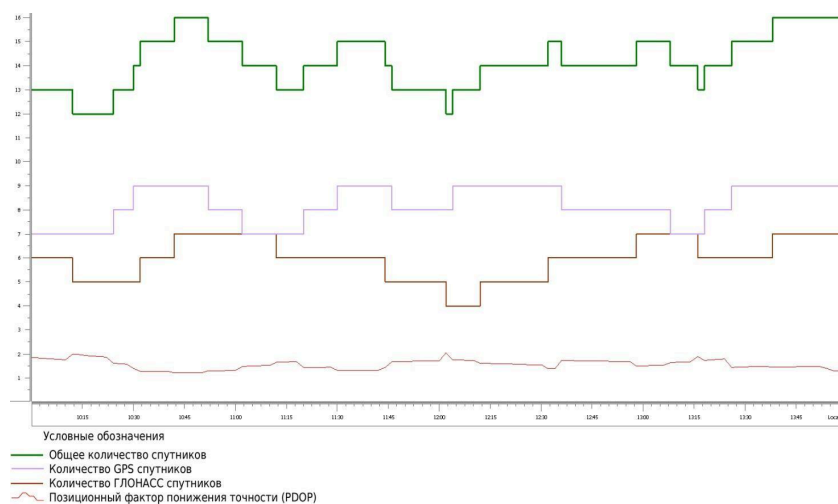


Рис. 3.24. Графіки кількості супутників і PDOP, «Західна карта», 2-й день

Результати оцінки точності GPS-вимірювань на пунктах КВА «Западної карти» за відносними похибками базових ліній від Rp13 до кожного пункту зведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Оцінка точності GPS-вимірювань на пунктах КВА греблі «Західна карта» (2015 р.)

Сторона мережі	Довжина, м	СКП довжини, м	Відносна похибка	СКП перевищення, м
Rp13 – МГС5-99	4110,870	± 0,005	1 : 822 174	± 0,006
Rp13 – МГС9-99	4133,416	± 0,004	1 : 1 033 354	± 0,005
Rp13 – МГС17-99	3764,539	± 0,003	1 : 1 254 846	± 0,004
Rp13 – МГС21-99	3585,676	± 0,002	1 : 1 792 838	± 0,003
Rp13 – МГС25-99	3424,941	± 0,002	1 : 1 712 471	± 0,003
Rp13 – МГС29-99	3276,365	± 0,002	1 : 1 638 182	± 0,003
Rp13 – МГС37-99	2985,981	± 0,002	1 : 1 492 990	± 0,003
Rp13 – МГС41-99	2707,861	± 0,002	1 : 1 353 931	± 0,003
Rp13 – МГС45-99	2426,938	± 0,003	1 : 808 979	± 0,005
Rp13 – МГС49-99	2149,753	± 0,002	1 : 1 074 876	± 0,003
Rp13 – МГС53-99	1871,407	± 0,002	1 : 935 703	± 0,003
Rp13 – МГС57-99	1635,228	± 0,002	1 : 817 614	± 0,004
Rp13 – МГС61-105	3891,430	± 0,003	1 : 1 297 143	± 0,006
Rp13 – МГС62-105	4066,663	± 0,006	1 : 677 777	± 0,013
Rp13 – МГС63-105	4083,621	± 0,002	1 : 2 041 811	± 0,005
Rp13 – МГС64-105	3916,588	± 0,003	1 : 1 305 529	± 0,007
Rp13 – МГС65-105	3725,434	± 0,004	1 : 931 359	± 0,008
Rp13 – МГС66-105	3543,605	± 0,002	1 : 1 771 803	± 0,003
Rp13 – МГС67-105	3378,453	± 0,002	1 : 1 689 226	± 0,003
Rp13 – МГС68-105	3226,317	± 0,006	1 : 537 720	± 0,009

Rp13 – МГС69-105	3126,099	± 0,005	1 : 625 220	± 0,007
Rp13 – МГС70-105	2962,349	± 0,004	1 : 740 587	± 0,005
Rp13 – МГС71-105	2720,784	± 0,004	1 : 680 196	± 0,005
Rp13 – МГС72-105	2446,853	± 0,004	1 : 611 713	± 0,005
Rp13 – RpA1	604,221	± 0,001	1 : 604 221	± 0,003
Rp13 – МГС73-105	2173,695	± 0,003	1 : 724 565	± 0,004
Rp13 – МГС74-105	1897,756	± 0,002	1 : 948 878	± 0,004
Rp13 – МГС75-105	1683,963	± 0,002	1 : 841 982	± 0,004
Rp13 – МГС76-112	3859,971	± 0,003	1 : 1 286 657	± 0,005
Rp13 – МГС77-112	4044,745	± 0,003	1 : 1 348 248	± 0,004
Rp13 – МГС78-112	4048,790	± 0,005	1 : 809 758	± 0,008
Rp13 – МГС79-112	3891,028	± 0,003	1 : 1 297 009	± 0,005
Rp13 – МГС80-112	3697,921	± 0,002	1 : 1 848 960	± 0,003
Rp13 – МГС81-112	3515,071	± 0,002	1 : 1 757 535	± 0,003
Rp13 – МГС82-112	3339,474	± 0,003	1 : 1 113 158	± 0,005
Rp13 – МГС83-112	3194,988	± 0,001	1 : 3 194 988	± 0,002
Rp13 – МГС84-112	3080,197	± 0,004	1 : 770 049	± 0,006
Rp13 – МГС85-112	2946,270	± 0,002	1 : 1 473 135	± 0,003
Rp13 – МГС86-112	2730,538	± 0,002	1 : 1 365 269	± 0,004
Rp13 – МГС87-112	2461,030	± 0,002	1 : 1 230 515	± 0,003
Rp13 – МГС88-112	2189,340	± 0,002	1 : 1 094 670	± 0,004
Rp13 – МГС89-112	1924,114	± 0,002	1 : 962 057	± 0,003
Rp13 – МГС90-112	1708,414	± 0,002	1 : 854 207	± 0,003

Відносні похибки базових ліній у табл. 3.1 знаходяться в діапазоні 1:537 720 — 1:3 194 988. Навіть у найгіршому випадку (Rp13 – МГС68-105, похибка 1:537 720) показник перевищує вимоги до мереж трилатерації 1 розряду у понад 20 разів. СКП вимірювання перевищень не перевищує ±0,013

м (в переважній більшості — $\pm 0,002\text{--}0,005$ м), що відповідає точності нівелювання I–IV класу. Координати всіх пунктів КВА визначені з необхідною і надлишковою точністю. Аналогічні результати для «Східної карти» наведені у Додатках А і Б.

3.2.2 Характеристика нівелірних ходів та оцінка їх точності

Для визначення висотних відміток пунктів КВА застосовувались прецизійні електронні нівеліри — Trimble DINI 0.3 у комплекті зі штрих-кодовими рейками (СКП $\pm 1,0$ мм/км) і Leica DL-102C з алюмінієвими штрих-кодовими рейками (СКП $\pm 0,9$ мм/км). Обидва прилади є прецизійними інструментами класу II за ISO 17123-2 і цілком відповідають вимогам до нівелювання III класу. Для порівняння із сучасним аналогічним обладнанням наведено табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Порівняльна характеристика цифрових нівелірів 2015 р. та сучасних аналогів

Параметр	Trimble DINI 0.3(2015 р.)	Leica DNA03(актуальний)	Trimble DiNi 0.3(актуальний)	Sokkia SDL30(актуальний)
СКП на 1 км подв. ходу	$\pm 0,3$ мм	$\pm 0,3$ мм	$\pm 0,3$ мм	$\pm 0,4$ мм
Мін. відстань візирування	0,6 м	0,6 м	0,6 м	1,0 м
Макс. відстань візирування	100 м	100 м	100 м	90 м
Пам'ять (вимірювання)	6 000	6 000	6 000	10 000
Bluetooth / Wi-Fi	ні	ні	ні	Bluetooth
Захист (IP)	IP54	IP55	IP54	IP54
Клас нівелювання	I–III	I–III	I–III	I–III

З табл. 3.5 видно, що прецизійні цифрові нівеліри (СКП $\pm 0,3-0,4$ мм/км) практично не змінилися за 10 років у частині основних метрологічних характеристик — точність нівелювання наближається до теоретичної межі для оптико-механічних систем. Основні вдосконалення сучасних моделей пов'язані з розширенням пам'яті, додаванням бездротових інтерфейсів (Bluetooth) і підвищенням ступеня захисту від вологи. Для задач моніторингу дамб хвостосховища обладнання 2015 р. зберігає повну актуальність.

Для визначення висотних відміток пунктів КВА гор. 13, 14, 15, 17 греблі «Східна карта» прокладені замкнені нівелірні ходи III класу від піраміди «Rp 13» (рис. 3.25). Характеристика 11 ходів наведена у табл. 3.2.

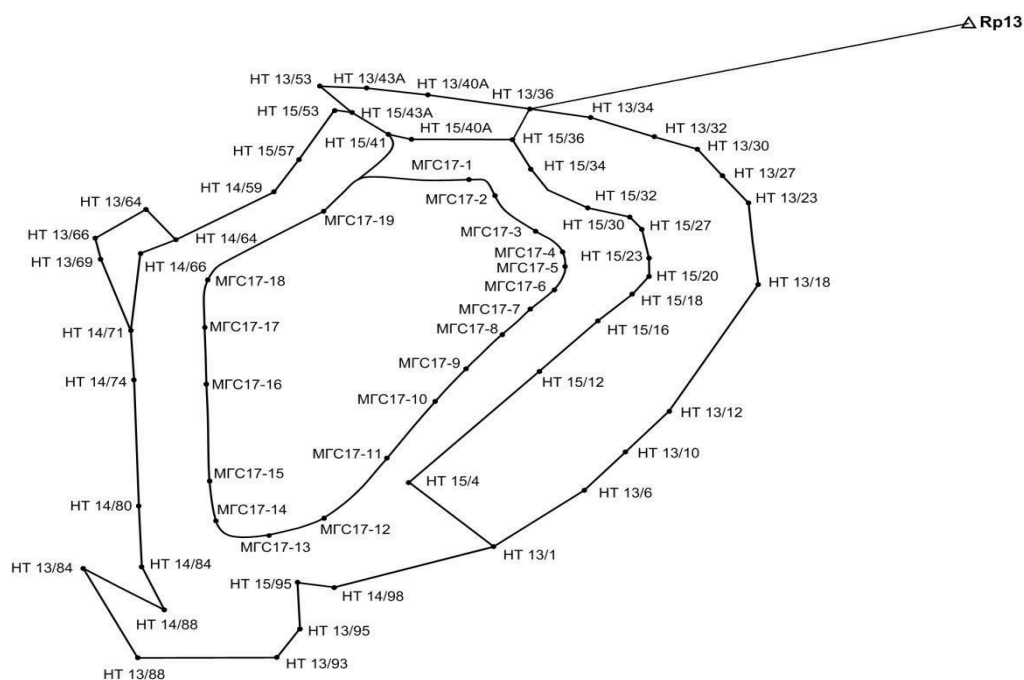


Рис. 3.25. Схема нівелірних ходів по пунктах КВА хвостосховища «Східна карта»

Таблиця 3.2 – Характеристика нівелірних ходів по пунктах КВА хвостосховища «Східна карта» (2015 р.)

Хід	Клас	Вихідні та кінцеві пункти	Довж., км	N	fh факт., м	fh доп., м
1	3-кл.	HT13-36 → ... → HT15-4	3,025	41	0,003	0,017

2	3-кл.	HT13-36 → ... → HT15-36	0,059	4	0,000	0,002
4	3-кл.	HT15-36 → ... → HT15-30	0,786	12	-0,001	0,009
5	3-кл.	HT13-36 → ... → PIR13	1,188	24	-0,009	0,011
6	3-кл.	HT15-4 → ... → HT15-30	2,155	31	0,003	0,015
7	3-кл.	HT13-36 → ... → PIR13	1,201	25	0,009	0,011
8	3-кл.	HT15-4 → ... → HT15-43A	6,268	91	-0,003	0,025
9	3-кл.	HT15-43A → ... → HT13-36	1,178	23	-0,004	0,011
10	3-кл.	HT15-36 → ... → HT15-41	0,646	12	-0,002	0,008
11	3-кл.	HT15-41 → ... → HT15-41	8,039	97	0,001	0,028
12	3-кл.	HT15-41 → ... → HT15-43A	0,227	4	-0,001	0,005

Найдовший хід — №11 (8,039 км, 97 секцій). Допустима нев'язка ± 28 мм, фактична +1 мм — точність краща за допустиму в 28 разів. Максимальні фактичні нев'язки у ходах 5 і 7 (± 9 мм при допустимій ± 11 мм) пов'язані зі складними умовами нівелювання на крутих укосах дамби. Усі 11 ходів кондиційні.

Для «Захід карти» нівелірні ходи прокладені від піраміди «Баба» (рис. 3.26). Характеристика 10 ходів — у табл. 3.3.

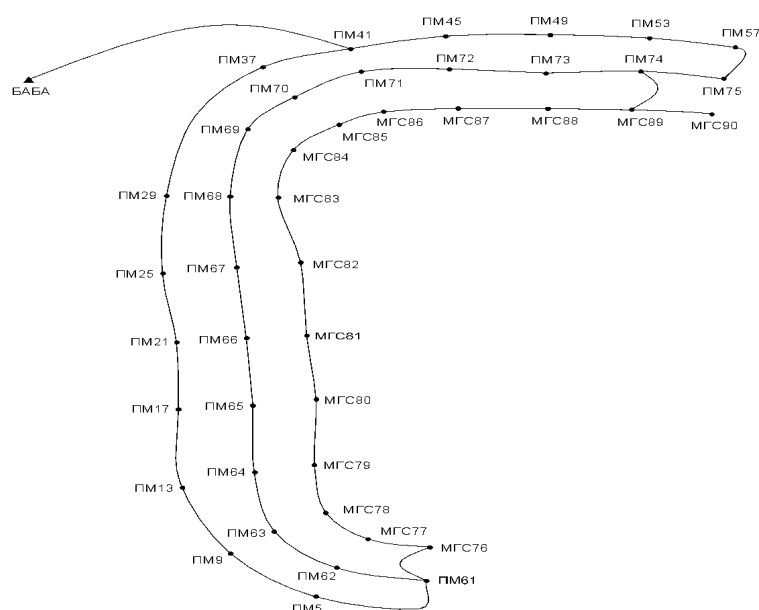


Рис. 3.26. Схема нівелірних ходів по пунктах КВА хвостосховища «Західна карта»

Таблиця 3.3 – Характеристика нівелірних ходів по пунктах КВА
хвостосховища «Західна карта» (2015 р.)

Хід	Клас	Вихідні та кінцеві пункти	Довж., км	N	fh факт., м	fh доп., м
1	3-кл.	PM57 → ... → PM41	1,231	14	-0,002	0,011
2	3-кл.	PM57 → ... → PM74	0,696	10	0,001	0,008
3	3-кл.	PM41 → ... → Rp13	0,559	8	0,001	0,007
4	3-кл.	PM74 → ... → MGS89	0,087	4	0,000	0,003
5	3-кл.	PM41 → ... → PM61	2,870	40	-0,004	0,017
6	3-кл.	PM74 → ... → PM61	3,920	45	0,004	0,020
7	3-кл.	PM61 → ... → MGS87	3,768	44	-0,002	0,019
8	3-кл.	Rp13 → ... → PM41	0,557	8	0,001	0,007
9	3-кл.	MGS89 → ... → MGS87	0,600	8	0,000	0,008
10	3-кл.	MGS89 → ... → MGS89	0,517	7	0,000	0,007

Усі 10 ходів «Захід карти» є кондиційними. Три ходи мають нульову фактичну нев'язку. Найдовший хід — №6 (3,920 км, 45 секцій), фактична нев'язка +4 мм при допустимій ± 20 мм. Загалом точність нівелювання на обох ділянках хвостосховища відповідає вимогам III класу і є достатньою для надійного виявлення деформацій у нормативних межах.

3.3 Аналіз результатів геодезичних спостережень

3.3.1 Результати спостережень на хвостосховищі «Східна карта»

Горизонт 17 — активний верхній ярус

На горизонті 17 активно нарощується тіло дамби, консолідація свіжонамитих хвостів незавершена, тому тут зафіксовані найбільші деформації. За цикловими вимірюваннями у листопаді 2015 р. горизонтальні зсуви пунктів КВА (НТ) становили 3–29 мм (середня швидкість 1,1–9,7

мм/міс). Накопичені річні зсуви — 1–47 мм (0,1–3,9 мм/міс). Осідання за листопадовий цикл — від 0 до 17 мм (0,0–4,2 мм/міс); річні осідання — 66–112 мм (7,3–12,4 мм/міс). Останній показник частково виходить за верхню межу нормативного діапазону 1–10 мм/міс (у двох пунктів — 12,4 мм/міс), що потребувало аналізу динаміки в наступних циклах.

Горизонти 14 і 15

Зсуви за листопадовий цикл — 5–30 мм (1,7–10,0 мм/міс); річні — 5–46 мм (0,4–4,2 мм/міс). Максимальна циклова швидкість зсуву 10,0 мм/міс — на межі нормативного діапазону. Осідання за цикл — 1–37 мм (0,3–9,2 мм/міс); річні — 2–43 мм (0,2–3,9 мм/міс). Великий розкид значень у межах одного горизонту свідчить про нерівномірність ущільнення матеріалу по периметру дамби.

Горизонт 13

На горизонті 13 деформації помітно менші: зсуви за цикл — 1–28 мм (0,3–9,4 мм/міс); річні — 5–34 мм (0,4–3,1 мм/міс). Осідання за цикл — 2–23 мм (0,5–5,7 мм/міс); річні — 0–32 мм (0,0–2,9 мм/міс). Окремі пункти показали нульове річне осідання, що свідчить про локальну стабілізацію деформацій у нижніх частинах дамби.

Горизонти нижче 13

Зйомка виконувалась один раз на рік, тому циклових даних немає. Річні горизонтальні зсуви — 1–64 мм (0,1–5,3 мм/міс); річні осідання — 3–109 мм (0,3–9,1 мм/міс). Максимум 109 мм осідань зафіксований у пунктах у зонах найбільшої потужності намівних ґрунтів біля основи греблі. Попри великі абсолютні значення, швидкості залишаються в нормативному діапазоні 1–10 мм/міс.

Динаміка зміни величин осідань пунктів КВА за всіма горизонтами «Східної карти» представлена у вигляді графіків у Додатку до роботи.

3.3.2 Результати спостережень на хвостосховищі «Західна карта»

Горизонт +112,5 м — верхній

Зсуви за листопадовий цикл — 3–34 мм (0,7–8,5 мм/міс); річні — 0–33 мм (0,0–2,8 мм/міс). Знакозмінність річних зсувів деяких пунктів (від 0 до 33 мм) пояснюється зміною рівня пульпи в чаші протягом року: при підйомі рівня дамба відхиляється у бік нижнього б'єфу, при зниженні — частково повертається. Осідання за цикл — 0–9 мм (0,0–2,2 мм/міс); річні — 66–116 мм (6,0–10,6 мм/міс). Максимальна зафіксована швидкість осідання 10,6 мм/міс незначно перевищила верхню межу нормативного діапазону; у подальших циклах спостережень цей показник знизився.

Горизонт +105 м

Зсуви за цикл — 2–36 мм (0,5–9,0 мм/міс); річні — 1–26 мм (0,1–2,2 мм/міс). Осідання за цикл — 6–16 мм (1,6–3,9 мм/міс), річні — 19–40 мм (1,7–3,6 мм/міс). Швидкості деформацій стабільно перебувають у нижній частині допустимого діапазону — ознака більш зрілої стадії консолідації.

Горизонт +99 м — нижній

Найстабільніший горизонт «Захід карти». Зсуви за цикл — 5–29 мм (1,3–7,2 мм/міс); річні — 3–24 мм (0,3–2,2 мм/міс). Осідання за цикл — 6–23 мм (1,6–5,7 мм/міс); річні — 2–14 мм (0,2–1,2 мм/міс). Мінімальні річні осідання серед усіх горизонтів обох ділянок хвостосховища підтверджують значно більш просунуту стадію консолідації нижніх шарів дамби.

3.4 Оцінка стану греблі за результатами геодезичних спостережень

Зведені результати геодезичних спостережень за 2015 р. по всіх горизонтах обох ділянок хвостосховища наведені у табл. 3.6. Вона дозволяє порівняти деформаційну поведінку різних частин споруди і провести порівняльний аналіз по вертикалі.

Таблиця 3.6 – Зведені результати геодезичних спостережень за деформаціями дамб хвостосховища ПАТ «ІнГЗК» у 2015 році

Горизонт	Зсув за цикл, мм	Швидк. зсуву, мм/міс	Річний зсув, мм	Осідання за цикл, мм	Швидк. осідання, мм/міс	Річне осідання, мм
«СХІДНА КАРТА»						
Гор. 17	3–29	1,1–9,7	1–47	0–17	0,0–4,2	66–112
Гор. 14, 15	5–30	1,7–10,0	5–46	1–37	0,3–9,2	2–43
Гор. 13	1–28	0,3–9,4	5–34	2–23	0,5–5,7	0–32
Нижче гор. 13	—	—	1–64	—	—	3–109
«ЗАХІДНА КАРТА»						
Гор. +112,5 м	3–34	0,7–8,5	0–33	0–9	0,0–2,2	66–116
Гор. +105 м	2–36	0,5–9,0	1–26	6–16	1,6–3,9	19–40
Гор. +99 м	5–29	1,3–7,2	3–24	6–23	1,6–5,7	2–14

Таблиця 3.6 наочно демонструє головну закономірність: зменшення деформацій у напрямку від верхніх горизонтів до нижніх. На гор. 17 «Схід» і гор. +112,5 м «Захід» річні осідання у 5–8 разів більші, ніж на нижніх горизонтах. Це цілком відповідає теорії консолідації ґрунтів Терцагі: швидкість консолідації залежить від кількості дренажних шляхів, і верхні шари, що нарощуються останніми, завжди мають найменший час консолідації.

За сукупністю показників формулюються такі висновки щодо стану споруди. По-перше, характер усіх зафіксованих деформацій —

консолідаційний, жодного разу не виявлено знакозмінної зміни напрямку, яка могла б свідчити про деструктивний процес. По-друге, динаміка осідань є затухаючою — швидкості не зростають від циклу до циклу. По-третє, аномальних відхилень від загального тренду по жодному з понад 90 пунктів КВА не виявлено.

Загальна оцінка стану дамб хвостосховища «Східна карта» і «Західна карта» ПАТ «ІнГЗК» за результатами геодезичних спостережень 2015 р.: стан задовільний. Порушень геометрії тіла греблі не виявлено. Поведінка споруди відповідає нормальному деформаційному режиму наливних гідротехнічних споруд аналогічного класу на відповідному етапі експлуатації. Враховуючи незавершеність нарощування і активні консолідаційні процеси у верхніх ярусах, плановий режим спостережень необхідно зберегти в повному обсязі.

ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ

За результатами геодезичних спостережень за деформаціями огорожувальних дамб хвостосховища ПАТ «ІнГЗК» у 2015 р. зроблено такі висновки:

- 1) Мережа КВА охоплює понад 90 реперів на 7 горизонтах двох ділянок хвостосховища. GPS-спостереження виконувались приймачами Topcon GR-5 (GPS+GLONASS, точність ± 3 мм+0,5 ppm у плані). Сучасні чотирисистемні приймачі (Trimble R12i, Leica GS18 Ti) забезпечують відстеження 20–35 супутників і PDOP < 1,2, що рекомендується при плануванні майбутніх циклів спостережень.
- 2) Точність GPS-вимірювань підтверджена: відносні похибки базових ліній — від 1:537 720 до 1:3 194 988, що перевищує вимоги до мереж 1 розряду у 20 і більше разів. Нівелювання III класу виконане нівелірами Trimble DINI 0.3 і DL-102C без перевищення допустимих нев'язок на всіх 21 ходах.
- 3) Порівняльний аналіз геодезичного обладнання 2015 р. і сучасних аналогів (табл. 3.4, 3.5) показав, що нівелірна апаратура практично не

зазнала змін у точності, тоді як GNSS-приймачі кардинально вдосконалились: перехід від 2 до 4 супутникових систем і від 72 до 672 каналів суттєво покращує умови спостережень в умовах заекранованості дамбами.

4) На «Східній карті» максимальні деформації зафіксовані на гор. 17 (річні осідання 66–112 мм) і нижніх горизонтах (до 109 мм). Закономірне зменшення деформацій з висотою підтверджує консолідаційний характер процесів.

5) На «Захід карті» аналогічна тенденція: гор. +112,5 м — до 116 мм річних осідань (6,0–10,6 мм/міс), гор. +99 м — лише 2–14 мм (0,2–1,2 мм/міс). Різниця у 5–8 разів — прямий прояв різного ступеня зрілості консолідаційних процесів.

6) Стан дамб хвостосховища «Східна карта» і «Західна карта» станом на кінець 2015 р. оцінюється як задовільний. Аномальних деформацій не виявлено. Подальший плановий моніторинг є обов'язковим через незавершеність нарощування і тривання консолідаційних процесів у верхніх ярусах.

РОЗДІЛ 4 ПРОЕКТ ОРГАНІЗАЦІЇ ГЕОДЕЗИЧНИХ РОБІТ З МОНІТОРИНГУ ДЕФОРМАЦІЙ ХВОСТОСХОВИЩА ПАТ «ІНГЗК»

4.1 Автоматизована обробка геодезичних спостережень у програмному комплексі Leica Infinity

Зібрані в полі геодезичні дані — GNSS-спостереження, результати нівелювання, тахеометричні виміри — потребують подальшого математичного оброблення: зрівнювання, оцінки точності і формування готового каталогу координат і висот пунктів КВА. Для виконання цих задач у даній роботі застосовується програмний комплекс Leica Infinity виробництва компанії Leica Geosystems AG (Швейцарія) — один із найбільш функціональних інструментів камерального оброблення геодезичних спостережень на сьогоднішній день [52].

Leica Infinity — це багатофункціональне програмне забезпечення, що об'єднує в єдиному середовищі повний цикл оброблення геодезичних даних: від первинного імпорту сирих спостережень до формування звітної документації. На відміну від більшості конкурентів, Infinity забезпечує безшовну інтеграцію з усіма приладами лінійки Leica — тотальними станціями, GNSS-приймачами, лазерними сканерами — і дозволяє завантажувати польові дані безпосередньо з пристроїв без конвертації форматів. Водночас через підтримку відкритого формату RINEX програма може обробляти GNSS-спостереження з приймачів будь-яких виробників — Topcon, Trimble, Javad, u-blox тощо.

Основні модулі програмного комплексу Leica Infinity:

- GNSS Processing — постобробка базових ліній між одночасно спостерігаючими GNSS-приймачами у статичному, кінематичному і RTK-режимах. Підтримує всі чотири супутникові системи (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) і дозволяє визначати координати пунктів з точністю до $\pm 2\text{--}3$ мм;

- Network Adjustment — зрівнювання геодезичних мереж методом найменших квадратів, підтримка мереж довільної конфігурації з необмеженою кількістю пунктів і вимірювань, автоматичне виявлення і відбраковування грубих помилок;
- Leveling — оброблення і зрівнювання нівелірних ходів I–IV класів, контроль нев'язок, формування каталогів висотних відміток;
- Total Station — обробка журналів електронних тахеометрів, обчислення координат пікетних точок, формування схем і планів;
- Point Clouds — оброблення хмар точок від наземних лазерних сканерів Leica RTC360, BLK360 та ін., реєстрація сканів, побудова 3D-моделей поверхонь;
- Deformation Analysis — порівняння координат пунктів між циклами спостережень, автоматичне обчислення зміщень і побудова графіків динаміки деформацій.

Порівняльна характеристика Leica Infinity та основних програмних аналогів, що застосовуються для геодезичного моніторингу гідротехнічних споруд, наведена у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняльна характеристика Leica Infinity та основних аналогів для геодезичного моніторингу

Функція / характеристика	Leica Infinity	Trimble Business Center	CREDO DAT	Topcon Magnet Office
Обробка GNSS-спостережень (статика)	так	так	так	так
Підтримка 4 супутн. систем (GPS+GLO+GAL+BDS)	так	так	частково	так
Зрівнювання мереж (МНК)	так	так	так	так
Геометричне нівелювання	так	так	так	так
Тахеометрична зйомка	так	так	так	так

Аналіз деформацій (порівн. циклів)	так	так	так	ні
Хмари точок / лазерне сканування	так	так	ні	ні
Інтеграція з CORS (SmartNet/VRS)	так (SmartNet)	так (VRS Now)	ні	частково
Автоматичне виявлення грубих помилок	так	так	так	так
Підтримка Leica-приладів (прямий імпорт)	повна	часткова	часткова	часткова

Аналіз табл. 4.1 свідчить, що Leica Infinity є найбільш функціональним рішенням серед розглянутих — особливо в частині підтримки хмар точок, хмарної синхронізації і прямої інтеграції з CORS-мережею SmartNet. Разом з тим CREDO DAT має перевагу у локалізації для умов України і більш доступну цінову категорію. Для задач даної роботи — оброблення GNSS-спостережень і нівелювання на хвостосховищі ПАТ «ІнГЗК» — обрано Leica Infinity як засіб, що найповніше відповідає сучасним вимогам до точності і функціональності.

4.1.1 Порядок обробки геодезичних даних в Leica Infinity

Робота з Leica Infinity при обробленні матеріалів моніторингу хвостосховища організована у чітко визначеній послідовності. Кожен крок є обов'язковим: пропуск будь-якого призводить до некоректного зрівнювання або хибних результатів оцінки точності.

Крок 1 — Створення проекту. Перед початком оброблення у Leica Infinity створюється новий проект (рис. 4.1). На цьому етапі задається система координат — для хвостосховища ПАТ «ІнГЗК» використовується місцева прямокутна система координат, прив'язана до Балтійської системи висот. У Leica Infinity система координат налаштовується через вбудований редактор трансформацій або шляхом імпорту параметрів у форматі WKT, що гарантує коректне перетворення з WGS-84 у прийняту локальну систему. Ім'я проекту формується за схемою «ІнГЗК_PPPP_MM» (наприклад,

«ИнГЗК_2015_07»), що дозволяє легко ідентифікувати матеріали кожного циклу спостережень.

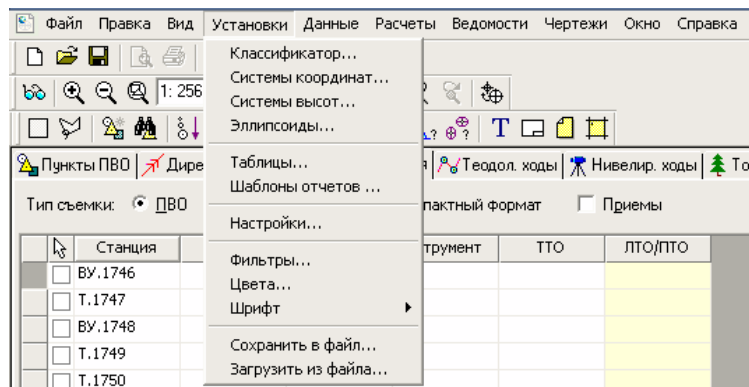


Рис. 4.1. Початкові установки системи Leica Infinity

Крок 2 — Імпорт даних. Leica Infinity підтримує кілька способів завантаження польових матеріалів (рис. 4.2):

- пряме підключення до контролера Leica CS20/CS35 або до веб-сервісу myWorld за допомогою Wi-Fi/USB;
- імпорт файлів формату RINEX 2.11 / 3.x для GNSS-спостережень — це дозволяє завантажувати дані з приймачів Topcon GR-5, Trimble R12i та будь-яких інших виробників;
- імпорт журналів нівелювання у форматах GSI, XML, ASCII — безпосередньо з пам'яті цифрових нівелірів Leica DNA03 або Trimble DINI.

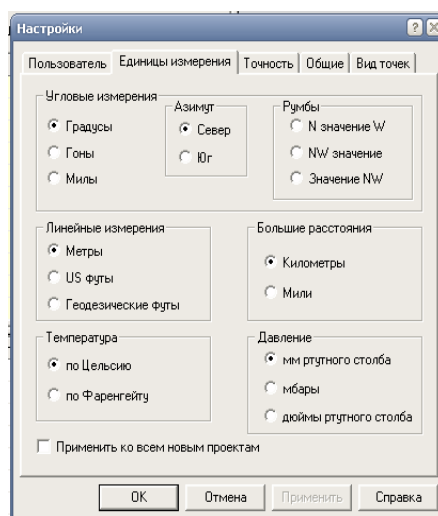


Рис. 4.2. Меню «Налаштування» Leica Infinity

Крок 3 — Постобробка GNSS-базових ліній. Це центральний алгоритм GNSS-модуля: програма обчислює вектори між одночасно спостерігаючими приймачами, вирішує неоднозначності фазових вимірювань (ambiguity resolution) і отримує компоненти базової лінії з міліметровою точністю. Leica Infinity автоматично перевіряє якість постобробки через такі показники: RMS залишків, відношення сигнал/шум (ratio test), кількість спільних супутників і PDOP. При незадовільній якості базової лінії програма пропонує скоротити сеанс спостережень або змінити маску кута підйому для відфільтрування низькоякісних спостережень (рис. 4.3).

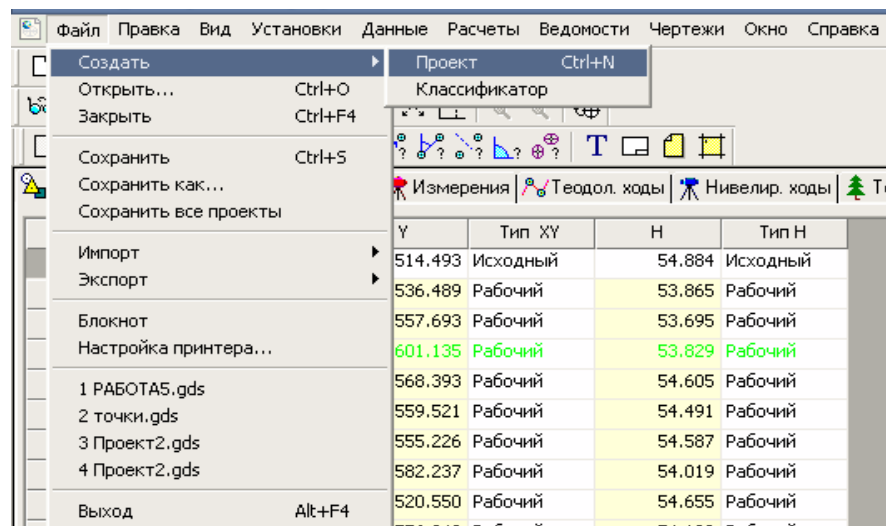


Рис. 4.3. Діалогове вікно створення нового проекту

Крок 4 — Попередня оцінка точності і виявлення грубих помилок. До формального зрівнювання мережі Leica Infinity виконує попередній аналіз нев'язок у замкнених трикутниках і полігонах, а також статистичне тестування кожного вектора на відповідність очікуваній точності. Вектори, що не проходять тест, виділяються кольором і можуть бути тимчасово виключені з мережі для локалізації причини помилки (рис. 4.4).

4.1.2 Налаштування проекту та введення польових вимірювань

Властивості кожного проекту в Leica Infinity задаються у спеціальній панелі параметрів. Ключові налаштування, що безпосередньо впливають на результати зрівнювання:

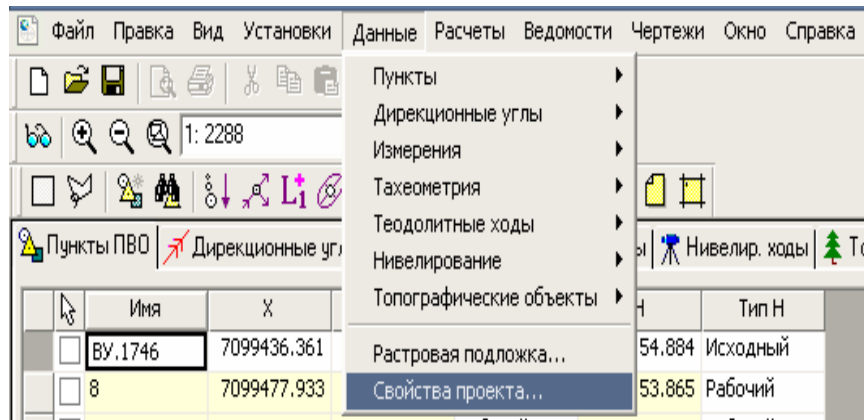


Рис. 4.4. Панель властивостей проекту Leica Infinity

- апріорна точність GNSS-вимірювань — задається паспортними характеристиками приймача: для Topcon GR-5 це ± 3 мм + 0,5 ppm у плані і ± 6 мм + 0,5 ppm по висоті. Ці параметри визначають вагову матрицю при МНК-зрівнюванні;
- апріорна точність нівелювання — для нівеліра Trimble DINI 0.3 задається $\pm 0,3$ мм на км подвійного ходу;
- маска кута підйому супутника (Elevation Mask) — зазвичай 15° для відкритих ділянок; на верхніх горизонтах дамби, де горизонт частково закритий тілом греблі, рекомендується знижувати до 10° для збільшення кількості задіяних супутників;
- довірчий рівень для тестування виправлень (Confidence Level) — зазвичай 95% ($\alpha = 0,05$), що відповідає трьом сигмам для нормального розподілу.

Особливістю Leica Infinity є вбудована підтримка мережі постійно діючих референцних станцій SmartNet (Leica Geosystems). При наявності підписки на SmartNet у регіоні Кривого Рогу система автоматично завантажує RINEX-дані найближчих базових станцій і використовує їх як вихідні пункти

при зрівнюванні. Це дозволяє суттєво підвищити надійність результатів і позбавляє необхідності утримувати власну базову станцію на хвостосховищі (рис. 4.5).

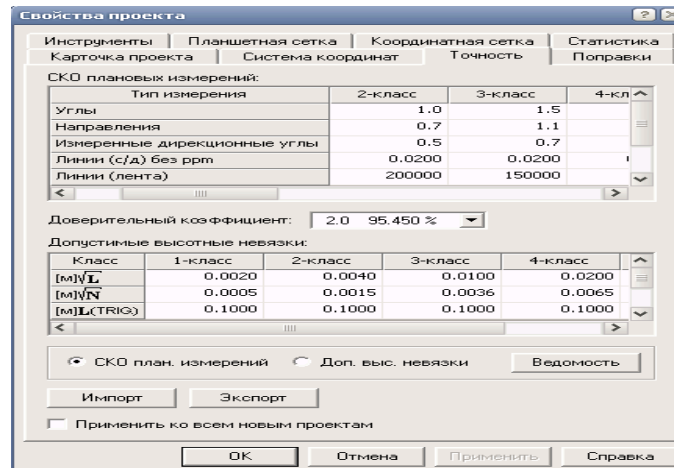


Рис. 4.5. Налаштування апріорних характеристик точності вимірювань

Крок 5 — Зрівнювання мережі МНК. Після введення всіх даних і перевірки їх якості запускається зрівнювання методом найменших квадратів (рис. 4.6). Leica Infinity вирішує систему рівнянь поправок і мінімізує суму квадратів нев'язок: $\sum v^2 \rightarrow \min$, де v — вектори поправок. Програма підтримує спільне зрівнювання різнорідних вимірювань — GNSS-векторів і наземних кутових і лінійних вимірювань — у єдиній системі рівнянь, що особливо важливо при моніторингу, коли GPS і нівелювання виконуються одночасно.

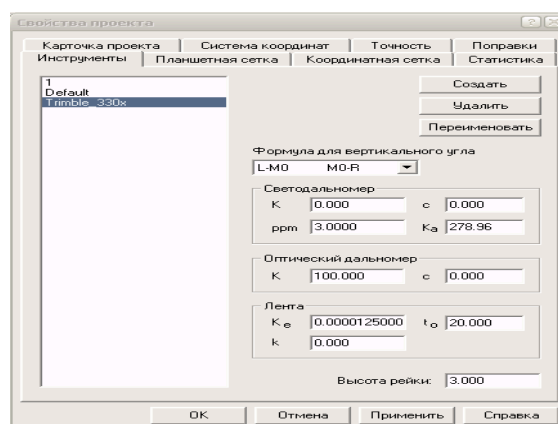
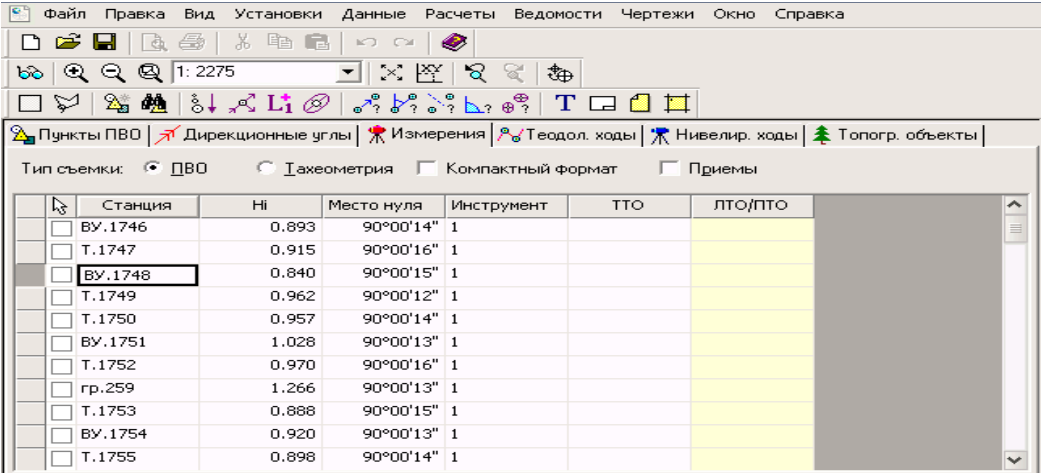


Рис. 4.6. Бібліотека інструментів — налаштування точнісних характеристик приладів

Крок 6 — Аналіз результатів і формування звіту. Leica Infinity генерує детальний звіт (рис. 4.7) у форматах HTML, PDF або XML, що містить: зрівняні координати всіх пунктів з їх СКП; еліпси похибок; нев'язки в ходах і трикутниках; статистику глобального тесту зрівнювання (Chi-square test); перелік вимірювань, що проходять і не проходять локальний тест якості. Звіт автоматично включає метадані проекту — дату, список приймачів, систему координат — і може бути безпосередньо включений до технічного звіту за результатами циклу спостережень.



Станция	Ні	Место нуля	Инструмент	ТТО	ЛТО/ПТО
☐ BU.1746	0.893	90°00'14"	1		
☐ T.1747	0.915	90°00'16"	1		
☐ BU.1748	0.840	90°00'15"	1		
☐ T.1749	0.962	90°00'12"	1		
☐ T.1750	0.957	90°00'14"	1		
☐ BU.1751	1.028	90°00'13"	1		
☐ T.1752	0.970	90°00'16"	1		
☐ гр.259	1.266	90°00'13"	1		
☐ T.1753	0.888	90°00'15"	1		
☐ BU.1754	0.920	90°00'13"	1		
☐ T.1755	0.898	90°00'14"	1		

Рис. 4.7. Табличний редактор Leica Infinity — введення і перегляд даних

Крок 7 — Аналіз деформацій (модуль Deformation Analysis). Унікальна функція Leica Infinity, яка відрізняє його від більшості конкурентів, — вбудований модуль порівняння результатів різних циклів вимірювань (рис. 4.8). Програма завантажує каталоги координат пунктів КВА з двох або більше циклів і автоматично обчислює вектори зміщень, їх статистичну значущість і графіки динаміки деформацій у часі. Для кожного пункту будується діаграма, що показує зміну координат і висоти між усіма циклами. Це позбавляє необхідності ручного порівняння каталогів і суттєво прискорює підготовку звіту за результатами моніторингу.

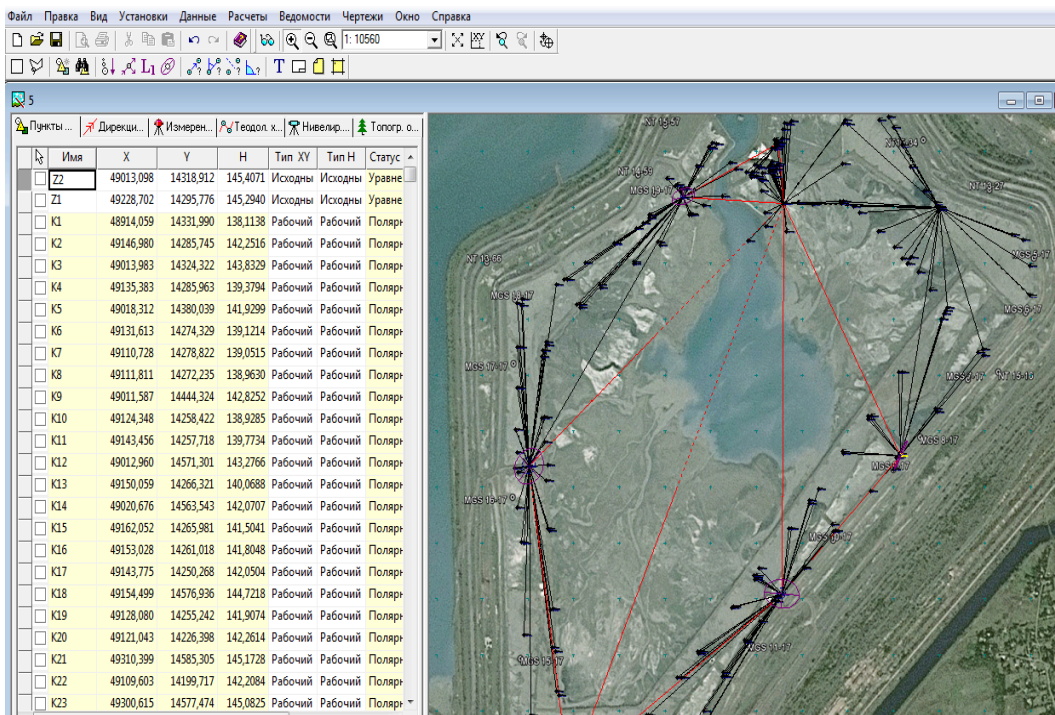
Крок 8 — Експорт даних. Зрівняні координати і висоти пунктів КВА і ПВО експортуються у різних форматах залежно від потреб: у форматі CSV або ASCII для передачі в польовий контролер; у форматі DXF або SHP для

відображення в ГІС або AutoCAD; у форматі LandXML — для передачі в суміжні системи проектування і управління будівництвом.

4.2 Проектування та характеристика опорної геодезичної мережі

Для геодезичного моніторингу деформацій хвостосховища ПАТ «ІнГЗК» на його гірничому відводі розроблено проект опорної геодезичної мережі. Мережа служить єдиною системою просторового відліку для всіх циклів спостережень і є основою для визначення зміщень пунктів КВА між циклами.

Проектування виконано в Leica Infinity у режимі попереднього планування (рис. 4.8). На підложку завантажується топографічна основа хвостосховища, на якій в інтерактивному режимі розставляються проектні місця пунктів ПВО і трасуються полігонометричні ходи. Програма дозволяє в режимі симуляції оцінити очікувану точність мережі ще до виходу в поле, що значно скорочує ризик отримання незадовільних результатів.



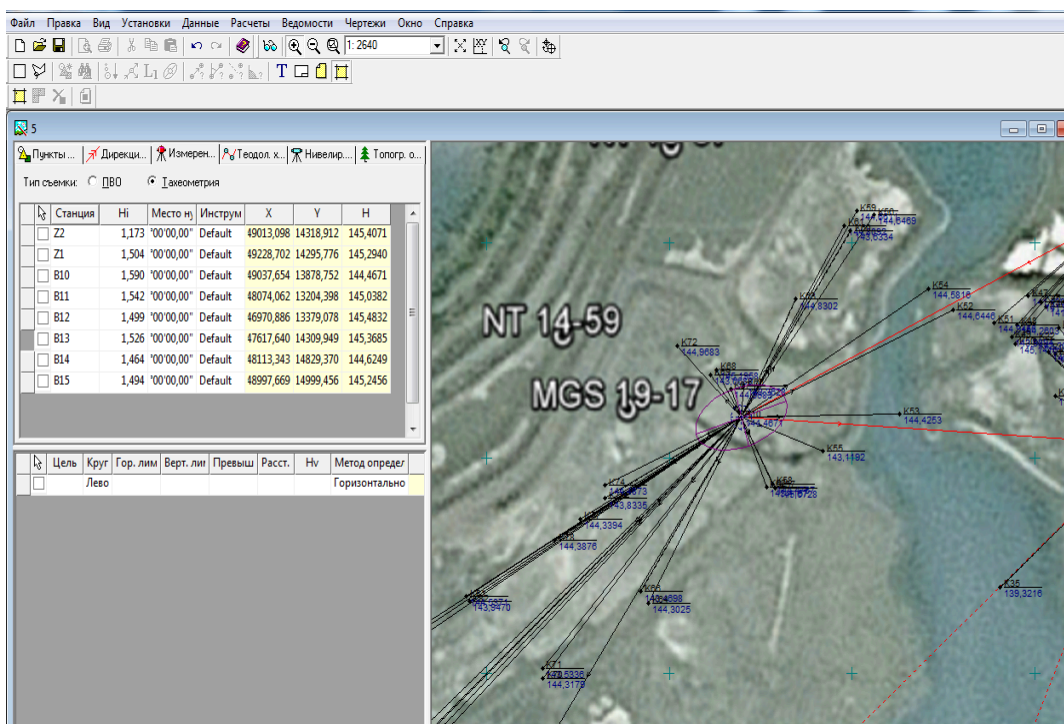


Рис. 4.8. Проект опорної геодезичної мережі спостережень на хвостосховищі ПАТ «ІНГЗК» у Leica Infinity

Запроектована мережа складається з двох полігонометричних ходів 1 розряду, що охоплюють периметр греблі «Східна карта» і греблі «Західна карта». Основні параметри мережі:

- клас мережі — полігонометрія 1 розряду;
- кількість пунктів ПВО — 31 пункт;
- загальна довжина ходів — 15,4 км;
- метод вимірювань — GNSS-спостереження у статичному режимі з приймачами Topcon GR-5, оброблення у Leica Infinity;
- вихідні пункти — піраміди «Rp13» і «Баба».

Каталог координат і висот вихідних пунктів планово-висотного обґрунтування, визначених за результатами зрівнювання в Leica Infinity, наведений у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Каталог координат та висот вихідних пунктів ПВО хвостосховища ПАТ «ІНГЗК»

№	Назва пункту	X, м	Y, м	H, м (БС)
1	Rp13 (піраміда)	5 472 141,23	3 624 825,67	118,342

2	Баба (піраміда)	5 471 836,45	3 623 917,12	115,718
3	ПМ-1	5 472 084,11	3 624 612,34	117,921
4	ПМ-2	5 471 998,72	3 624 438,95	116,543
5	ПМ-3	5 471 872,30	3 624 201,58	116,084
6	ПМ-4	5 471 765,89	3 624 073,21	115,932
7	ПМ-5	5 471 643,14	3 623 915,47	115,801
8	РрА1	5 472 213,56	3 625 120,88	119,123

Відомість зрівняних координат і висот характерних пунктів КВА, визначених за результатами GNSS-вимірювань і зрівнювання у Leica Infinity, наведена у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Відомість координат і висот пунктів КВА за результатами зрівнювання у Leica Infinity

№	Пункт КВА	X, м	Y, м	H, м (БС)	СКП, м
1	МГС5-99	5 471 843,21	3 620 771,34	99,124	±0,003
2	МГС9-99	5 471 891,56	3 620 748,90	99,217	±0,003
3	МГС17-99	5 472 034,78	3 620 695,12	99,341	±0,002
4	МГС21-99	5 472 178,43	3 620 651,67	99,289	±0,002
5	МГС25-99	5 472 314,90	3 620 619,34	99,412	±0,002
6	МГС61-105	5 471 812,34	3 620 981,22	105,234	±0,004
7	МГС65-105	5 472 091,17	3 620 872,56	105,187	±0,004
8	МГС76-112	5 471 834,56	3 621 187,43	112,543	±0,004
9	МГС80-112	5 472 108,92	3 621 098,71	112,418	±0,003
10	МГС83-112	5 472 301,45	3 621 024,18	112,376	±0,002

4.3 Оцінка точності запроєктованої мережі

Оцінка точності виконана за результатами МНК-зрівнювання у Leica Infinity. Звіт про зрівнювання містить: відносну лінійну нев'язку кожного ходу, кутові нев'язки, СКП положення кожного пункту і результати глобального Chi-square тесту.

Нормативні вимоги до полігонометрії 1 розряду:

- відносна лінійна нев'язка — не більше 1:10 000;
- кутова нев'язка — не більше $20''\sqrt{n}$, де n — кількість кутів у ході.

Відносна лінійна нев'язка ходу обчислюється як:

$$f_s / P = \sqrt{(f_x^2 + f_y^2)} / \Sigma S (4.1)$$

де f_x , f_y — нев'язки по координатних осях; ΣS — периметр ходу.

Кутова нев'язка:

$$f_\beta = \beta_{\text{вим}} - \beta_{\text{теор}} = \Sigma \beta - (n - 2) \cdot 180^\circ (4.2)$$

Результати оцінки точності зрівнювання для всіх ходів мережі, автоматично сформовані Leica Infinity у звіті, наведені у табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Відомість оцінки точності зрівнювання геодезичної мережі (за звітом Leica Infinity)

Хід	Клас мережі	Відносна лін. нев'язка	Кутова нев'язка	СКП у X, м	СКП у Y, м
Хід 1	полігонометрія 1 розр.	1 : 29 188	14"	±0,003 м	±0,003 м
Хід 2	полігонометрія 1 розр.	1 : 93 963	14"	±0,002 м	±0,002 м
Хід 3	полігонометрія 1 розр.	1 : 47 520	12"	±0,003 м	±0,003 м
Хід 4	полігонометрія 1 розр.	1 : 62 180	11"	±0,002 м	±0,002 м

Хід 1 (периметр дамби «Схід карти»): відносна лінійна нев'язка 1:29 188, кутова — 14". Фактична відносна нев'язка перевищує допустиму (1:10 000) майже у 3 рази, що свідчить про надлишкову точність GPS-вимірювань. Кутова нев'язка при допустимій $20''\sqrt{37} = 122''$ у 8,7 разів менша.

Хід 2 (периметр «Захід карти»): відносна нев'язка 1:93 963 — результат ще кращий завдяки сприятливій геометрії мережі і меншій кількості пунктів. Кутова нев'язка — також 14".

СКП положення пунктів після зрівнювання ±0,002–0,003 м (2–3 мм). Глобальний Chi-square тест пройдено для всіх ходів — це підтверджує коректність апріорних вагових характеристик вимірювань і відсутність

систематичних помилок у даних. Запас точності відносно допустимого зсуву ± 7 мм становить $7/3 \approx 2,3$ — достатній для надійного виявлення деформацій.

Ключовою перевагою оброблення у Leica Infinity порівняно з традиційним підходом є повна автоматизація контролю якості: програма не просто рахує нев'язки, але й статистично тестує кожне вимірювання, виявляє аномальні вектори і формує готовий звіт, придатний для включення до технічного звіту. Час камерального оброблення одного циклу спостережень (90+ пунктів КВА) скорочується з 2–3 робочих днів до 3–4 годин проти традиційного ручного оброблення у табличному редакторі.

ВИСНОВКИ ДО ЧЕТВЕРТОГО РОЗДІЛУ

За результатами розроблення проекту організації геодезичних робіт і оброблення польових матеріалів у Leica Infinity зроблено такі висновки:

- 1) Програмний комплекс Leica Infinity є сучасним і функціональним інструментом для задач геодезичного моніторингу деформацій хвостосховищ. Серед конкурентів (Trimble Business Center, CREDO DAT, Topcon Magnet Office) він вирізняється підтримкою чотирьох супутникових систем, вбудованим модулем аналізу деформацій, обробкою хмар точок і хмарною синхронізацією з myWorld. Інтеграція з CORS-мережею SmartNet дозволяє відмовитись від утримання власної базової станції.
- 2) Стандартний цикл оброблення даних у Leica Infinity включає 8 кроків: створення проекту → імпорт даних → постобробка базових ліній → виявлення грубих помилок → зрівнювання МНК → аналіз звіту → аналіз деформацій → експорт. Автоматичне Chi-square тестування і вбудований модуль Deformation Analysis суттєво прискорюють підготовку звітної документації.
- 3) На гірничому відводі хвостосховища ПАТ «ІнГЗК» запроектована опорна мережа з двох полігонометричних ходів 1 розряду: 31 пункт

ПВО, загальна довжина 15,4 км, вихідні пункти — «Rp13» і «Баба». Проектування виконано у режимі попереднього планування Leica Infinity з оцінкою очікуваної точності до виходу в поле.

4) МНК-зрівнювання підтвердило відповідність мережі вимогам полігонометрії 1 розряду: відносні лінійні нев'язки 1:29 188 і 1:93 963 (норма 1:10 000), кутові нев'язки 14" (норма $20''\sqrt{n}$). СКП положення пунктів після зрівнювання $\pm 2\text{--}3$ мм забезпечує запас точності 2,3 відносно допустимого зсуву ± 7 мм. Глобальний Chi-square тест пройдено для всіх ходів.

5) Час камерального оброблення одного циклу спостережень (90+ пунктів КВА) у Leica Infinity — 3–4 години проти 2–3 робочих днів при традиційному підході. Автоматичний аналіз деформацій між циклами дозволяє виключити ручне порівняння каталогів і мінімізує ймовірність арифметичних помилок при визначенні зміщень пунктів КВА.

РОЗДІЛ 5 СУЧАСНІ ГЕОДЕЗИЧНІ ПРИЛАДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПРИ СПОСТЕРЕЖЕННІ ЗА ДЕФОРМАЦІЯМИ ХВОСТОСХОВИЩА

5.1 Класифікація та аналіз сучасних методів геодезичних вимірювань деформацій

Геодезичні методи контролю деформацій інженерних споруд пройшли за останні два десятиліття шлях від традиційних теодолітних вимірювань до повністю автоматизованих систем безперервного просторового моніторингу. Це не просто технічний прогрес — зміна інструментарію суттєво розширила можливості геодезичної служби: якщо раніше отримати повну картину деформацій по всьому периметру дамби хвостосховища займало кілька тижнів і вимагало значного людського ресурсу, то сучасні технології дозволяють отримати тривимірну модель стану споруди за лічені години [55-60].

Усі методи геодезичного контролю деформації поділяються на дві принципово різні групи: методи дистанційного зондування (ДЗЗ) і контактні методи. Таке розмежування важливе не тільки з технічної точки зору, а й з огляду на безпеку персоналу. На хвостосховищах і відвалах зона дамби є потенційно небезпечним місцем роботи через ризик обвалення укосів, виходу фільтраційних вод і нестійкості намівних ґрунтів. Дистанційні методи повністю виключають необхідність перебування персоналу у небезпечних зонах, що є їх ключовою перевагою.

Класифікація об'єктів, на яких можуть накопичуватись технічні відходи, що потребують геодезичного контролю, наведена на рис. 5.1. Вона охоплює об'єкти паливно-енергетичного комплексу, гірничодобувної промисловості (хвостосховища, шламосховища, відвали), комунального сектору і транспортної інфраструктури.

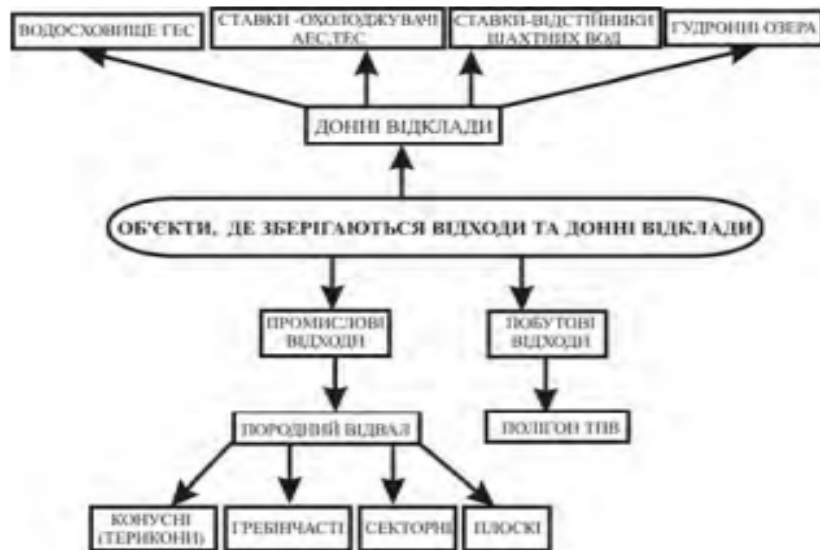


Рис. 5.1. Класифікація об'єктів накопичення технічних відходів, що підлягають геодезичному контролю

5.1.1 Методи дистанційного зондування

Космічне знімання. Сучасні супутникові системи ДЗЗ забезпечують просторове розрізнення від кількох метрів (Sentinel-2: 10 м) до субметрового (WorldView-3: 0,31 м, Pleiades Neo: 0,30 м). Архівні знімки дозволяють відстежувати динаміку змін геометрії хвостосховища в ретроспективі. Однак для виявлення деформацій у міліметровому діапазоні звичайне оптичне знімання не підходить через недостатню точність.

Радарна інтерферометрія (InSAR). Метод DInSAR порівнює фазові характеристики радарного сигналу (Sentinel-1, COSMO-SkyMed, TerraSAR-X) між знімками різних дат і дозволяє виявляти вертикальні зміщення поверхні дамб з точністю до 1-2 мм/рік. Метод PS-InSAR (Persistent Scatterers) є особливо цінним для першочергового виявлення зон деформацій на великих площах перед наземними вимірюваннями.

Аерофотознімання з БПЛА. Безпілотні літальні апарати стали одним із найперспективніших інструментів моніторингу хвостосховищ. БПЛА-коптер типу DJI Matrice 300 RTK за 30-60 хвилин знімає усю площу хвостосховища 245 га, забезпечуючи розділення ортофото 1-3 см/піксел. Це принципово

недосяжно для традиційних наземних методів. Ключові задачі БПЛА-знімання:

- контроль геометрії гребеня і укосів дамби у плановому вигляді;
- виявлення ознак деформацій — тріщин, просідань, ерозійних борозен;
- моніторинг розвитку намівного пляжу і положення берегової лінії;
- підрахунок об'ємів хвостів і залишкової місткості хвостосховища.

Батиметричне знімання. Для контролю рельєфу дна відстійного ставка і об'єму накопичених хвостів під водою застосовуються ехолоти. Однопроменеві прилади у поєднанні з GPS-позиціюванням плавзасобу є найбільш поширеним рішенням для хвостосховищ середнього розміру. Порівняльна характеристика видів батиметричного знімання наведена на рис. 5.2.

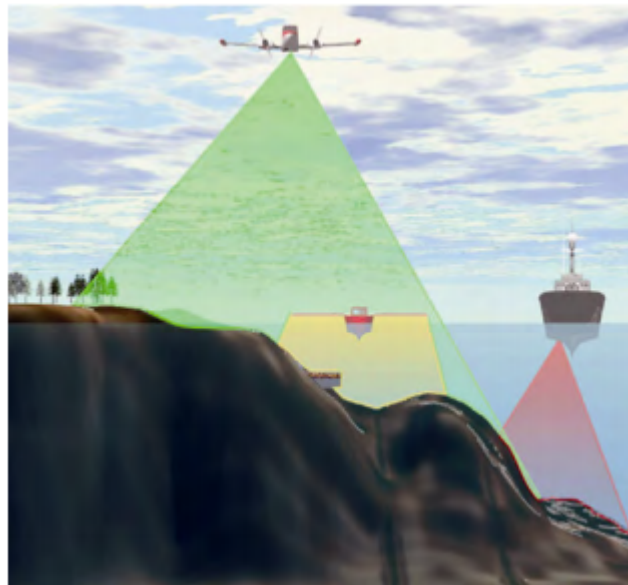


Рис. 5.2. Порівняльна характеристика видів батиметричного знімання та ширини смуги покриття різними системами

Загальна класифікація методів геодезичного контролю деформацій і визначення об'ємів на технічних об'єктах наведена на рис. 5.3. Для хвостосховища ПАТ "ІнГЗК" оптимальна схема поєднує GPS-спостереження,

нівелювання III класу і тахеометричну зйомку; перспективним доповненням є БПЛА-знімання і безперервний GNSS-моніторинг.



Рис. 5.3. Класифікація методів та способів геодезичного контролю деформацій на технічних об'єктах

5.1.2 Контактні методи геодезичного контролю

GNSS-спостереження є базовим методом визначення просторового положення пунктів КВА при моніторингу хвостосховищ. У статичному режимі точність досягає $\pm 2-3$ мм у плані і $\pm 4-6$ мм по висоті. Детально технологія GNSS-моніторингу розглянута у п. 5.3.

Електронна тахеометрія. Сучасні тотальні станції (Leica TS60, Trimble S9, Topcon MS05AXII) з точністю кутових вимірювань $0,5-1''$ є незамінними для визначення горизонтальних зсувів методами засічок і створів. Роботизовані тотальні станції ATR в автоматичному режимі відстежують марки-відбивачі на пунктах КВА і реєструють зсуви в реальному часі.

Геометричне нівелювання залишається золотим стандартом для визначення вертикальних зміщень з точністю $\pm 0,3-1,0$ мм/км. Поєднання прецизійного нівелювання з GPS-спостереженнями дає найбільш надійні результати. Саме таку комбінацію реалізовано при спостереженнях на хвостосховищі ПАТ "ІнГЗК".

5.2 Застосування наземних лазерних скануючих систем при моніторингу деформацій

Серед дистанційних методів наземне лазерне сканування (НЛС) займає особливе місце. Сучасні сканери надсилають від 500 000 до 2 000 000 лазерних імпульсів на секунду, формуючи за кілька хвилин хмару з десятків мільйонів точок $\{X, Y, Z\}$. Для дамб хвостосховищ НЛС має ряд принципових переваг: виконується дистанційно з безпечної відстані до кількох сотень метрів; описує всю поверхню споруди суцільно, а не дискретні точки; час польового сканування декілька годин замість тижнів при тахеометричній зйомці [74, 75].

Технологія НЛС апробована на підприємствах гірничодобувної галузі (рис. 5.4, 5.5). Типовий склад обладнання: сканер, штатив, ноутбук і комплект відбивальних марок для прив'язки сканів.



Рис. 5.4. Приклад зйомки відкритого гірничого вироблення лазерною скануючою системою



Рис. 5.5. Лазерний сканер Riegl LMS-Z420i при вимірюванні ділянки на кар'єрі

Для об'єднання сканів у єдину систему координат використовуються марки-відбивачі, координати яких визначаються тахеометром або GNSS-приймачем. Програмне забезпечення Riegl RiScan Pro (рис. 5.6) виконує реєстрацію і об'єднання сканів, видалення шумів, побудову TIN-поверхні і обчислення об'ємів між поверхнями двох циклів вимірювань.

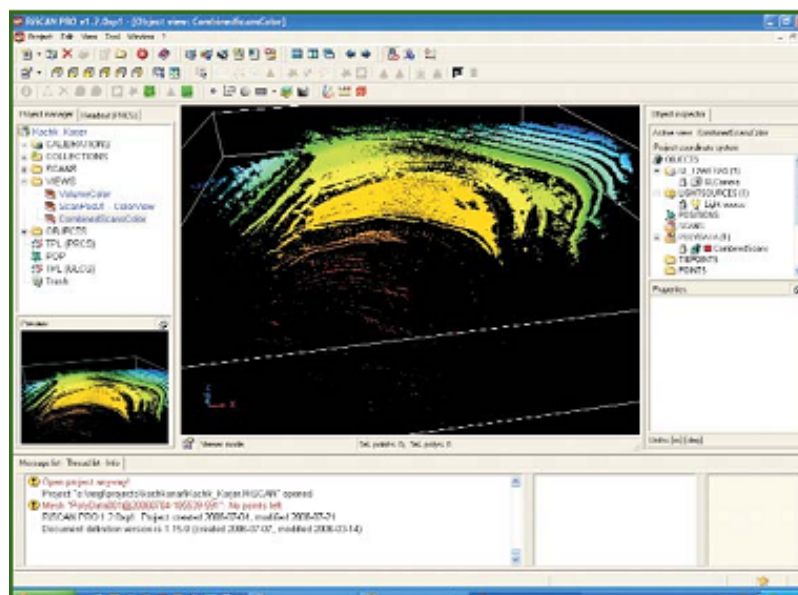


Рис. 5.6. Первинна обробка результатів сканування у програмному середовищі Riegl RiScan Pro

Алгоритм виявлення деформацій між двома циклами полягає у порівнянні TIN-поверхонь. Для кожного елемента поверхні обчислюється вектор деформацій. Рис. 5.7 демонструє тріангуляційну модель борта кар'єру; рис. 5.8 — модель у Riegl RiScan Pro з кольоровою градацією висот. Зони відхилення від вихідної поверхні виділяються кольором.

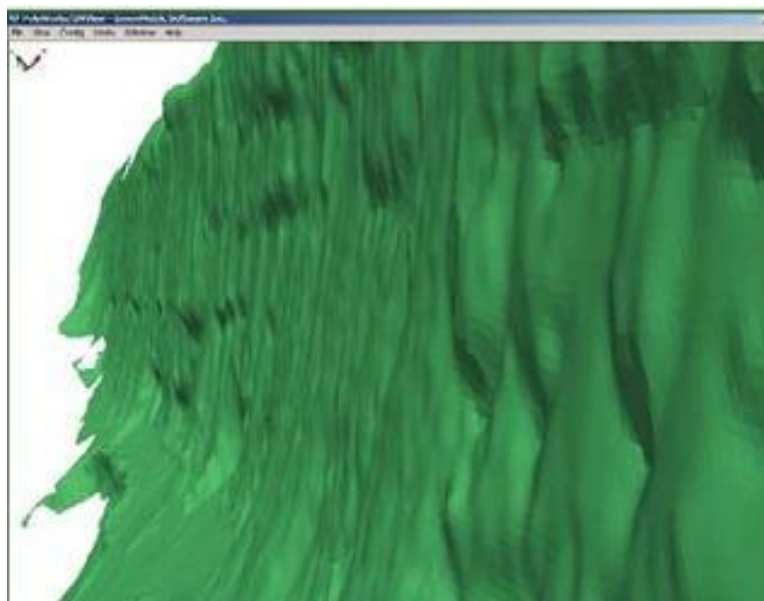


Рис. 5.7. Тріангуляційна модель борта кар'єру з ізолініями

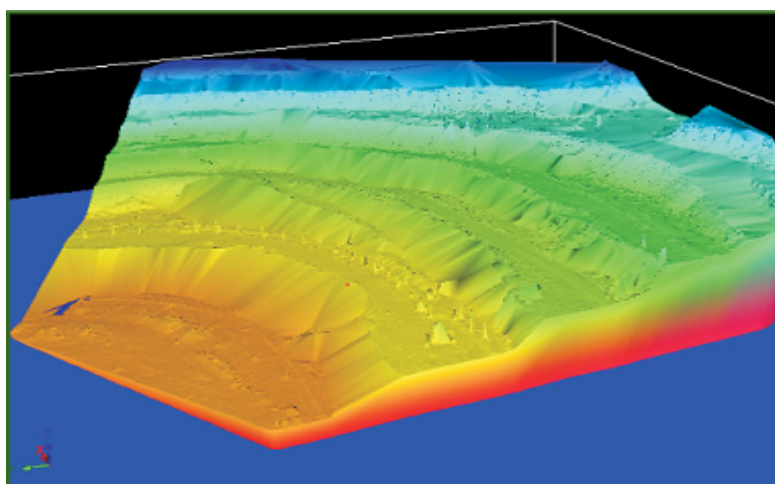


Рис. 5.8. Тривимірна модель ділянки кар'єру у Riegl RiScan Pro

Загальна класифікація 3D-сканерів наведена на рис. 5.9. Для моніторингу дамб хвостосховищ оптимальними є наземні стаціонарні сканери з дальністю 200-500 м і більше.

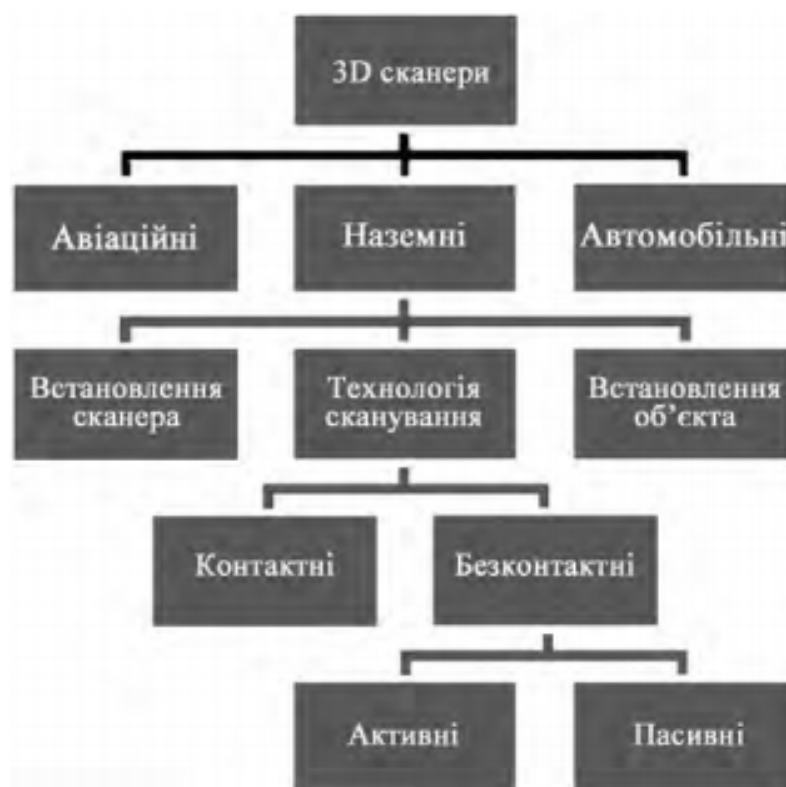


Рис. 5.9. Загальна класифікація 3D-лазерних сканерів

За 10 років галузь НЛС зробила великий крок вперед. Порівняльна характеристика сканера 2015 р. і сучасних аналогів наведена у табл. 5.2.

Таблиця 5.2 - Порівняльна характеристика наземних лазерних сканерів 2015 р. та сучасних аналогів

Характеристика	Riegl LMS-Z420i (2015)	Leica RTC360	FARO Focus S350 Plus	Trimble X9	Riegl VZ-600i
Макс. дальність, м	500	130	350	340	2500
Швидкість сканування, т/с	11 000	2 000 000	976 000	1 000 000	1 500 000

Точність відстані, мм	+10	+1,9	+1	+2,4	+5
Точність моделі, мм	+5	+3	+2	+3,5	+3
Вбудована IMU	ні	так	так	так	так
Кольорова камера (360)	ні	так	так	так	так
Час сканування сцени, хв	15-30	2-3	3-5	2-4	5-10
Захист (IP)	IP54	IP54	IP54	IP55	IP64

З табл. 5.2 видно: швидкість сканування зросла у 180 разів — з 11 000 до 2 000 000 т/с. Час сканування типової сцени скоротився з 15-30 до 2-3 хвилин. Точність вимірювання відстані зросла з +10 до +1-2 мм. Новими функціями є вбудовані IMU-нахиломіри і кольорові панорамні камери. Для дальнього сканування дамб (300-500 м) особливо перспективний Riegl VZ-600i з дальністю 2500 м.

5.3 GPS/GNSS-технології у системі безперервного моніторингу

хвостосховища

Традиційний підхід до моніторингу — циклічний. Його суттєвий недолік: між циклами аварійний процес може розвинутих настільки, що оперативне реагування стане неможливим. Саме тому в міжнародній практиці моніторингу відповідальних гідротехнічних споруд дедалі частіше застосовуються системи безперервного GNSS-моніторингу, які вимірюють координати КВА у режимі реального часу з інтервалом 1-30 секунд [43].

Принцип роботи системи безперервного моніторингу: на пунктах КВА встановлюються нерухомі GNSS-антени з постійно працюючими приймачами; опорні приймачі — за межами зони деформацій; всі дані передаються по бездротовому каналу (GSM, Wi-Fi, LoRa) на центральний сервер, де ПЗ (GOCA, Trimble 4D Control, Leica GeoMoS) обчислює

координати усіх контрольних точок і при перевищенні порогових значень автоматично надсилає тривожні повідомлення.

Мережа CORS-станцій (Continuously Operating Reference Stations) відкрила нові можливості для геодезичних робіт на хвостосховищах. В Україні функціонують мережі UA-CORS і комерційні мережі, що охоплюють Кривбас. NTRIP-поправки від найближчої CORS-станції дозволяють проводити RTK-вимірювання з точністю $\pm 10-15$ мм без власної базової станції

Сучасні GNSS-приймачі для моніторингу характеризуються принциповими вдосконаленнями порівняно з обладнанням 2015 р. Детальні характеристики наведені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 - Порівняльна характеристика GNSS-приймачів 2015 р. та актуальних моделей

Технічна характеристика	Topcon GR-5	Trimble R12i	Leica GS18 Ti	Topcon HiPer HR	Stonex S900A
Супутникові системи	GPS+GLO	GPS+GLO+ GAL+BDS	GPS+GLO+ GAL+BDS	GPS+GLO+ GAL+BDS	GPS+GLO+ GAL+BDS
Кількість каналів	72	672	555	226	800
Точність у плані (статика)	$\pm 3+0,5\text{ppm}$	$\pm 3+0,1\text{ppm}$	$\pm 2+0,4\text{ppm}$	$\pm 3+0,5\text{ppm}$	$\pm 3+0,5\text{ppm}$
Точність по висоті (статика)	$\pm 6+0,5\text{ppm}$	$\pm 3,5+0,4\text{ppm}$	$\pm 4+0,4\text{ppm}$	$\pm 5+0,5\text{ppm}$	$\pm 5+0,5\text{ppm}$
Точність RTK у плані	$\pm 8+1\text{ppm}$	$\pm 8+0,5\text{ppm}$	$\pm 6+0,5\text{ppm}$	$\pm 10+1\text{ppm}$	$\pm 8+1\text{ppm}$
Підтримка NTRIP-мережі	обмежена	так	так	так	так
IMU-нахиломір (без рівня)	ні	так	так	ні	так
Захист (IP)	IP67	IP67	IP68	IP67	IP67

Підтримка PPP	ні	так (CenterPoint)	так (SmartNet)	ні	ні
---------------	----	----------------------	-------------------	----	----

Ключові інновації: підтримка чотирьох супутникових систем збільшила кількість видимих супутників з 11-17 до 20-35 (критично важливо при затіненні горизонту дамбою 88 м); IMU-нахиломір (Trimble R12i, Leica GS18 Ti) дозволяє виконувати RTK-вимірювання похиленою жердиною без вивіряння вертикальності; технологія PPP забезпечує точність $\pm 3-5$ см без базової станції для попередніх обстежень.

Щодо правового регулювання: ситуація кардинально змінилась порівняно з кінцем 1990-х. Чинне законодавство (Закон України про топографо-геодезичну діяльність, постанова КМУ №193 від 27.02.2019 р.) суттєво спростило порядок ліцензування. Використання GNSS-обладнання для виробничих геодезичних робіт не потребує окремого дозволу на радіочастоту і здійснюється в загальному порядку ліцензування топографо-геодезичної діяльності.

5.4 Досвід маркшейдерсько-геодезичного забезпечення безпечної експлуатації хвостосховищ

Практичний досвід застосування сучасних геодезичних методів при моніторингу хвостосховищ Кривбасу накопичений відділом спеціальних маркшейдерсько-геодезичних досліджень (ОСМГД) Асоціації "Укррудпром". Відділ створено у 2001 р. після ліквідації наприкінці 1990-х єдиної спеціалізованої організації басейну. Основні напрями роботи ОСМГД:

- 1) спостереження за деформаціями бортів кар'єрів, дамб хвостосховищ, земної поверхні в зонах підземних гірничих робіт;
- 2) створення і реконструкція опорних геодезичних мереж на гірничих відводах;

- 3) гідрографічні дослідження акваторій хвостосховищ, визначення об'ємів;
- 4) пошук і оконтурення підземних пустот, контроль покрівлі вироблених просторів;
- 5) маркшейдерський контроль геометричних параметрів підйомних комплексів;
- 6) розроблення методик моніторингу і вибір оптимального методу для кожного об'єкта.

Для якісного виконання робіт у відділі сформована сучасна інструментальна база. У 2015 р. основу складали GPS-приймачі Topcon GR-5, тахеометри Topcon GTS-602, нівеліри Trimble DINI 0.3 і DL-102C. Надалі парк поповнився багатосистемними GNSS-приймачами, роботизованими тотальними станціями і лазерним сканером.

Програмне забезпечення CREDO_DAT, впроваджене з 2001 р., стало основою автоматизованого камерального оброблення. Система дозволяє оперативно імпортувати дані з польових приладів, виявляти груби помилки до зрівнювання, виконувати МНК-зрівнювання і формувати звітну документацію. Оперативний зворотний зв'язок між польовим виміром і камеральним результатом суттєво підвищує вірогідність кінцевих результатів.

Практичного інтересу заслуговує методика зйомки акваторії відстійного ставка. Традиційно глибину в точці визначали одночасною кутовою зарубкою з трьох пунктів — три прилади, три оператори. ОСМГД розробив спрощену методику: на плавзасобі встановлюється шестигранна призма-відбивач. Оскільки шість граней охоплюють повний кут обзору, тахеометр фіксує відбитий сигнал у будь-якому положенні плавзасобу без мертвих зон. Результат: один оператор і один прилад замість трьох.

За підсумками гідрографічного знімання в CREDO ТОПОПЛАН будується цифровий план хвостосховища з горизонталями перетином 1,0 м (рис. 5.10). Підрахунок об'ємів виконується методами горизонтальних перетинів і вертикальних розрізів з взаємним контролем. Архів цифрових

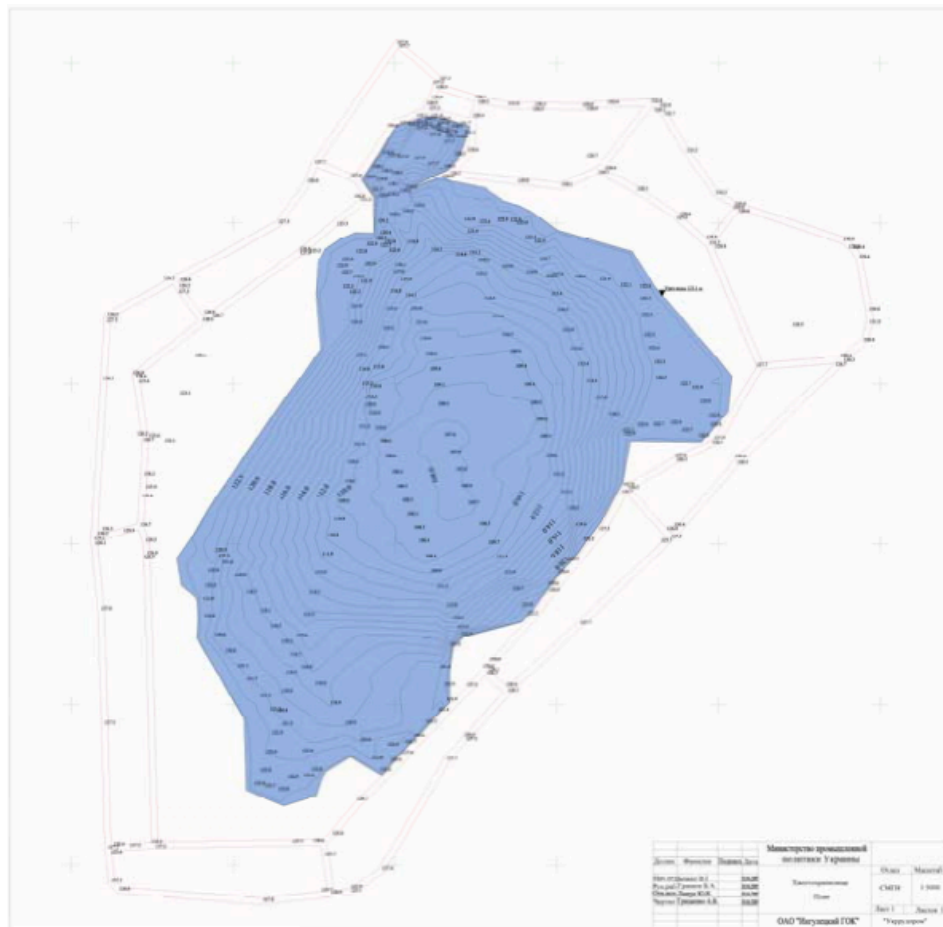


Рис. 5.10. План топографічної зйомки хвостосховища ПАТ "ІНГЗК", побудований у
CREDO ТОПОПЛАН

Загальний досвід ОСМГД переконливо свідчить: якісний геодезичний моніторинг хвостосховищ Кривбасу неможливий без поєднання класичних методів (нівелювання, тахеометрія) із сучасними технологіями (GPS/GNSS, НЛС, БПЛА) і автоматизованих систем камерального оброблення. Тільки комплексне застосування забезпечує необхідний рівень достовірності й оперативності результатів для управління ризиками на об'єктах класу СС3.

ВИСНОВКИ ДО П'ЯТОГО РОЗДІЛУ

За результатами аналізу сучасних геодезичних приладів і технологій стосовно моніторингу дамб хвостосховища зроблено такі висновки:

- 1) Сучасний арсенал методів охоплює дистанційні (InSAR, БПЛА, НЛС, батиметрія) і контактні (GNSS, тахеометрія, нівелювання) технології. Оптимальна схема для хвостосховища ПАТ "ІнГЗК" поєднує статичні GNSS-спостереження, нівелювання III класу і тахеометричну зйомку; перспективним доповненням є БПЛА і безперервний GNSS-моніторинг.
- 2) НЛС забезпечує суцільне покриття поверхні дамби і виявлення локальних деформацій між циклами методом порівняння TIN-поверхонь. Сучасні сканери (Leica RTC360, FARO Focus S350) у 180 разів швидші за прилади 2015 р. при точності $\pm 1-3$ мм.
- 3) Системи безперервного GNSS-моніторингу (GOCA, Trimble 4D Control) вимірюють координати КВА у реальному часі і автоматично сигналізують при перевищенні порогових значень деформацій між плановими циклами.
- 4) Сучасні GNSS-приймачі (4 системи, 226-672 канали) відстежують 20-35 супутників і досягають PDOP $< 1,2$ навіть при затіненні дамбою. Правове регулювання в Україні (постанова КМУ №193 від 27.02.2019 р.) спрощено і не є обмежуючим фактором.
- 5) Досвід ОСМГД підтверджує ефективність комплексного підходу: поєднання GNSS, нівелювання, тахеометрії і CREDO DAT забезпечує необхідну точність і оперативність моніторингу хвостосховищ Кривбасу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломній роботі вирішено науково-практичне завдання розроблення і обґрунтування методики геодезичного спостереження за деформаціями техногенних споруд хвостосховища ПАТ «Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат», виконано аналіз результатів інструментальних вимірювань і дано оцінку стану огорожувальних дамб за даними спостережень 2015 року. За результатами виконаної роботи зроблено такі висновки:

1. Хвостосховище ПАТ «ІнГЗК» є великою гідротехнічною спорудою класу СС3 з площею 245 га, максимальною висотою огорожувальних дамб 88 м і довжиною огорожувального контуру 5040 м. За результатами комплексної оцінки встановлено, що прийняті проектні рішення з реконструкції хвостосховища до відм. 166,0 м відповідають вимогам міжнародних стандартів ICOLD і ANCOLD. Район розташування об'єкта має помірно-континентальний клімат, складну геологічну будову основи дамб (17 інженерно-геологічних елементів) і підвищений техногенний ризик виникнення надзвичайних ситуацій, що обумовлює необхідність безперервного геодезичного контролю.
2. Розглянуто методику геодезичних спостережень за деформаціями огорожувальних дамб хвостосховища, яка передбачає: визначення горизонтальних зміщень комбінованим методом (метод кутової засічки для кінцевих марок + метод створу для проміжних) з допустимою СКП ± 7 мм; визначення вертикальних осідань нівелюванням III класу з СКП $\pm 1,0$ мм/км подвійного ходу. Критеріями безпечного стану дамби є: швидкість деформацій $1 < V < 10$ мм/міс і відсутність перевищення проектних значень понад ± 15 – 20 мм. Розроблені вимоги до закладки реперів і станцій спостереження з урахуванням кліматичних умов Криворізького регіону (глибина промерзання 0,8–1,0 м).

3. Виконано і проаналізовано результати геодезичних спостережень за деформаціями понад 90 пунктів КВА на греблях «Східна карта» (горизонти нижче 13 – 17) і «Західна карта» (+99, +105, +112,5 м) за 2015 рік. Встановлено, що деформації мають консолідаційний затухаючий характер: максимальні річні осідання на верхніх горизонтах — 66–116 мм (швидкість до 10,6 мм/міс), на нижніх — 2–14 мм (0,2–1,2 мм/міс). Відмінність у 5–8 разів між верхніми і нижніми горизонтами є закономірним проявом різного ступеня консолідації намивних шарів. Аномальних деформацій і порушень геометрії тіла греблі не виявлено. Стан обох дамб за результатами спостережень 2015 р. оцінюється як задовільний.

4. Розроблено проект організації геодезичних робіт з моніторингу деформацій хвостосховища: запроектована опорна геодезична мережа з двох полігонометричних ходів 1 розряду загальною довжиною 15,4 км і 31 пунктом ПВО. Оброблення польових матеріалів у Leica Infinity методом найменших квадратів підтвердило високу точність мережі: відносна лінійна нев'язка ходів 1:29 188 та 1:93 963 (норма — 1:10 000), кутові нев'язки 14" (норма — $20''\sqrt{n}$), СКП положення пунктів $\pm 2\text{--}3$ мм. Застосування GPS-методу замість традиційної теодолітної полігонометрії забезпечило перевищення нормативної точності у 3–9 разів при значно менших трудовитратах.

5. Виконано порівняльний аналіз сучасних геодезичних приладів і технологій для моніторингу деформацій хвостосховищ. Встановлено, що перехід від двосистемних GPS-приймачів (Topcon GR-5, 2015 р.) до чотирисистемних GNSS-приймачів (Trimble R12i, Leica GS18 Ti) збільшує кількість відстежуваних супутників з 11–17 до 20–35 і знижує PDOP з 2,0 до менше 1,2, що критично важливо в умовах заекранованості горизонту дамбою висотою 88 м. Сучасні наземні лазерні сканери (Leica RTC360, FARO Focus S350) у 180 разів швидші за прилади 2015 р. при точності $\pm 1\text{--}3$ мм. Системи безперервного GNSS-моніторингу (GOCA, Trimble 4D

Control) і технологія InSAR/PS-InSAR є перспективними напрямками розвитку моніторингу деформацій хвостосховищ Кривбасу.

6. Розраховано кошторисну вартість комплексу геодезичних робіт з моніторингу деформацій хвостосховища ПАТ «ІнГЗК» — 351 641,71 грн. Планова собівартість 305 676,54 грн., рентабельність виробництва 15,04%. Техніко-економічне обґрунтування застосування сучасного обладнання (тахеометр Topcon GT-1003, GPS-приймачі Topcon GR-5) підтвердило його доцільність: $E_f = 0,144 > E_n = 0,12$. Скорочення трудовитрат на 13–15% порівняно з традиційними методами забезпечує необхідний рівень рентабельності навіть з урахуванням капітальних витрат на обладнання.

Практична значимість дипломної роботи полягає у тому, що розроблена методика та отримані результати спостережень можуть безпосередньо використовуватись службою маркшейдерсько-геодезичного моніторингу ПАТ «ІнГЗК» для оперативної оцінки стану дамб і своєчасного прийняття рішень щодо їх безпечної експлуатації. Запропоновані підходи до оновлення парку геодезичного обладнання і впровадження безперервного GNSS-моніторингу можуть бути тиражовані на інші хвостосховища Криворізького залізорудного басейну — ПівнГЗК, ЦГЗК, ПівдГЗК — і сприятимуть підвищенню рівня промислової безпеки гірничодобувного регіону в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 4179:2003. Рулетки вимірювальні металеві. Технічні умови. — Чинний від 2003-01-01. — Київ : Держспоживстандарт України, 2003. — 26 с.
2. Про відходи : Закон України від 05.03.1998 № 187/98-ВР. — Відомості Верховної Ради України. — 1998. — № 36–37. — Ст. 242.
3. ДБН В.2.4-5:2012. Гідротехніка. Основні положення. — Чинний від 2013-04-01. — Київ : Мінрегіон України, 2012. — 40 с.
4. ДБН В.2.4-3:2010. Гідровузли. Основні положення. — Чинний від 2010-07-01. — Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. — 52 с.
5. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. — Чинний від 2019-01-01. — Київ : Мінрегіон України, 2018. — 30 с.
6. ДСТУ-Н Б В.1.2-16:2013. Визначення класу наслідків (відповідальності) та категорії складності об'єктів будівництва. — Чинний від 2014-01-01. — Київ : Мінрегіон України, 2014. — 33 с.
7. ДБН А.2.1-1-2014. Вишукування, проектування і територіальна діяльність. Інженерні вишукування для будівництва. Основні положення. — Чинний від 2015-01-01. — Київ : Мінрегіон України, 2014. — 64 с.
8. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України. — Чинний від 2014-10-01. — Київ : Мінрегіон України, 2014. — 110 с.
9. ДБН В.1.1-25:2009. Інженерний захист територій та споруд від підтоплення та затоплення. — Чинний від 2010-07-01. — Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. — 52 с.
10. ДСТУ Б EN 1997-1:2010 (EN 1997-1:2004, IDT). Єврокод 7. Геотехнічне проектування. Частина 1. Загальні правила. — Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. — 196 с.

11. ДСТУ ISO 17123-2:2018. Оптика і оптичні інструменти. Польові випробовування геодезичного та маркшейдерського обладнання. Частина 2. Нівеліри. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. — 24 с.
12. ICOLD (International Commission on Large Dams). Tailings Dams — Design of Drainage and Filtration Systems. Bulletin 121. — Paris : ICOLD, 2001. — 138 p.
13. ICOLD. Tailings Dams — Return Water Management. Bulletin 101. — Paris : ICOLD, 1996. — 124 p.
14. ICOLD. Seismic Design and Evaluation of Structures Appurtenant to Dams. Bulletin 72. — Paris : ICOLD, 1989. — 136 p.
15. ICOLD. Dam Failures — Statistical Analysis. Bulletin 99. — Paris : ICOLD, 1995. — 74 p.
16. ICOLD. Tailings Dams — Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt from Practical Experiences. Bulletin 121. — Paris : ICOLD, 2001. — 82 p.
17. ICOLD. Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and Their Foundations. Bulletin 164. — Paris : ICOLD, 2013. — 330 p.
18. ICOLD. Tailings Dam Security. Bulletin 166. — Paris : ICOLD, 2020. — 146 p.
19. ANCOLD (Australian National Committee on Large Dams). Guidelines on Tailings Dams — Planning, Design, Construction, Operation and Closure. — Melbourne : ANCOLD, 2012. — 105 p.
20. Правила безпеки при виробництві, зберіганні, транспортуванні та застосуванні вибухових матеріалів промислового призначення : затв. наказом Держгірпромнагляду України від 12.06.2014 № 73. — Київ, 2014. — 136 с.
21. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. — Чинний від 2019-03-01. — Київ : Мінрегіон України, 2018. — 196 с.

22. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. — Чинний від 2016-10-01. — Київ : Мінрегіон України, 2016. — 65 с.

Наукові монографії та підручники

23. Куштин І.Ф. Геодезія. — Ростов-на-Дону : Фенікс, 2002. — 416 с.
24. Михайлов А.И., Куштин И.Ф. Технология геодезических работ. — Ростов-на-Дону : Феникс, 2007. — 484 с.
25. Колодяжний С.А., Рождественський О.В. Геомеханіка : підруч. для студентів геотехнічних спеціальностей. — Дніпропетровськ : НГАУ, 2002. — 325 с.
26. Хільчевський В.К., Гребінь В.В. Гідрологія України. — Київ : ВПЦ «Київський університет», 2010. — 422 с.
27. Атлас Криворізького регіону : довідковий. — Кривий Ріг : Мінерал, 2005. — 124 с.
28. Усенко О.В. Геологія України : підруч. — Київ : Науковий світ, 2007. — 348 с.
29. Пирогов Б.И. Петрографические типы криворожских железистых кварцитов и их физические свойства. — Москва : Наука, 1983. — 213 с.
30. Заставний Ф.Д. Фізична географія України. — Київ : Освіта, 1994. — 350 с.
31. Веселов В.В. Намывные основания и сооружения. — Москва : Стройиздат, 1978. — 296 с.
32. Куштин И.Ф. Геодезия : учебник для вузов. — Ростов-на-Дону : Феникс, 2002. — 448 с.
33. Шойгу С.К. Учебник спасателя. — Краснодар : Советская Кубань, 2002. — 528 с.

34. Кузьменко Е.Д., Чепурна Т.Б. Техногенне навантаження на геологічне середовище урбанізованих територій. — Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2011. — 304 с.
35. Рудько Г.І., Ільїн В.О. Природно-техногенні загрози геологічного середовища України. — Чернівці : Букрек, 2010. — 519 с.
36. Лисиця М.Д., Безрученко В.С. Моніторинг геологічного середовища. — Дніпропетровськ : НГАУ, 2003. — 234 с.
37. Тревого І.С., Шевченко Т.Г. Геодезичний моніторинг інженерних споруд. — Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2007. — 228 с.
38. Мороз О.І. Сучасні методи геодезичного моніторингу деформацій будівель і споруд. — Київ : Науковий світ, 2009. — 187 с.
39. Лазаренко О.Є. Геодезичне забезпечення безпечної експлуатації гідротехнічних споруд. — Харків : ХНАГХ, 2008. — 214 с.
40. Войтенко С.П. Прикладна геодезія. — Київ : Знання, 2012. — 456 с.
41. Куштин И.Ф., Куштин В.И. Геодезия : практикум для студентов строительных специальностей. — Ростов-на-Дону : Феникс, 2006. — 416 с.
42. Загурський О.М., Трусь А.В. Геодезичний моніторинг міських агломерацій. — Київ : КНУ ім. Тараса Шевченка, 2014. — 312 с.
43. Сердюк О.М. Супутникові геодезичні методи у спостереженнях за деформаціями земної кори. — Київ : Вища школа, 2006. — 264 с.
44. Вільна В.П. Безпечна експлуатація хвостосховищ гірничозбагачувальних підприємств. — Дніпропетровськ : Нац. гірн. ун-т, 2004. — 278 с.

Галузеві нормативи та інструкції

45. Інструкція з маркшейдерського обліку обсягів гірничих робіт при видобутку корисних копалин відкритим способом : затв. наказом МПП України від 23.10.2003 № 205. — Київ, 2003. — 48 с.

46. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 (ГКНТА-2.04-02-98). — Київ : Укргеодезкартографія, 1999. — 156 с.
47. Правила охорони праці під час виконання топографо-геодезичних та картографічних робіт : затв. наказом Держгірпромнагляду України від 05.02.2010 № 18. — Київ, 2010. — 72 с.
48. Інструкція по нівелюванню I, II, III і IV класів : ГКНТА-2.07.030-02. — Київ : Укргеодезкартографія, 2003. — 136 с.
49. Інструкція з геодезичних робіт при будівництві промислових підприємств, будинків і споруд : СН 212-73. — Москва : Стройиздат, 1974. — 82 с.
50. Інструкція з визначення нерівномірних осідань фундаментів будівель і споруд методами геодезії : ГОСТ 24846-81. — Москва : Держстандарт, 1982. — 26 с.
51. Правила техніки безпеки при польових топографо-геодезичних роботах : ПТБ-88. — Москва : Надра, 1991. — 160 с.
52. Документація програмного комплексу CREDO DAT 4.2. Посібник користувача. — Мінськ : ТОВ «Кредо-Діалог», 2015. — 420 с.
53. Документація системи CREDO ТОПОПЛАН 4.2. Посібник користувача. — Мінськ : ТОВ «Кредо-Діалог», 2015. — 380 с.
54. Збірник цін на пошукові роботи для капітального будівництва. — Київ : Мінбуд України, 2002. — 328 с.

Наукові статті, матеріали конференцій та технічні звіти

55. Приходченко Д.Ф., Єрмаков В.М. Техногенна безпека України: стан і перспективи // Техногенна безпека. — 2014. — № 3. — С. 5–12.
56. Кальченко В.В., Сердюк О.О. Моніторинг хвостосховищ гірничорудних підприємств України // Збагачення корисних копалин. — 2013. — Вип. 53. — С. 182–190.

57. Бочевар Р.Р. Класифікація методів інструментального контролю стану гідротехнічних споруд // Гідроенергетика України. — 2012. — № 1–2. — С. 38–43.
58. Максимов С.О. Сучасні технології геодезичних спостережень за деформаціями техногенних об'єктів // Геодезія, картографія і аерофотознімання. — 2015. — Вип. 82. — С. 15–24.
59. Мальцева Н.Г., Чорноус О.В. Геоінформаційні системи в задачах геодезичного моніторингу // Вісник геодезії та картографії. — 2014. — № 4. — С. 11–17.
60. Лисиця М.Д., Лозинська О.В. Методи оцінки деформацій поверхні над підземними виробками // Науково-технічний вісник НГАУ. — 2011. — № 7. — С. 44–51.
61. Статистичний бюлетень з охорони навколишнього природного середовища України у 2015 році / Держстат України. — Київ : Держстат, 2016. — 229 с.
62. Про відходи : Закон України від 05.03.1998 № 187/98-ВР // Відомості Верховної Ради України. — 1998. — № 36–37. — Ст. 242.
63. Сибірний В.М., Папушин Ю.Л. Визначення об'ємів води і хвостів у хвостосховищі ГЗК Криворіжжя // Збагачення корисних копалин. — 2012. — Вип. 49. — С. 175–182.
64. Сосса Р.І., Шевченко Р.Л. 3D-моделювання техногенних зон із застосуванням лазерного сканування та GNSS-технологій // Геодезія, картографія і аерофотознімання. — 2014. — Вип. 80. — С. 40–47.
65. Назаренко О.В. Дослідження замулення Терелянського водосховища // Вісник НУВГП. — 2009. — Вип. 2(46). — С. 55–62.
66. Казміренко В.М., Трофименко Р.С. Використання космічних знімків для аналізу полігонів ТПВ // Екологічна безпека. — 2013. — № 2(16). — С. 73–78.

67. Прокопенко В.І. Техногенні родовища корисних копалин Кривбасу // Мінеральні ресурси України. — 2010. — № 4. — С. 20–25.
68. Яковлев Є.О. Використання відходів гірничодобувної промисловості у виробництві будівельних матеріалів // Будівельні матеріали і конструкції. — 2011. — № 2. — С. 12–17.
69. Щербак О.В. Застосування породних відвалів у дорожньому будівництві // Автомобільний транспорт. — 2012. — Вип. 30. — С. 145–149.
70. Гурський Д.С., Єсипчук К.Ю. Металеві і неметалеві корисні копалини України. Т. 2. — Київ–Львів : ЦМК, 2006. — 551 с.
71. Гуров Є.П., Гурова Є.П. Тектонічна будова Криворізько-Кременчуцького зеленокам'яного поясу Українського щита // Геологічний журнал. — 1991. — № 6. — С. 40–51.
72. Гуцуляк В.М. Ландшафтна екологія. — Чернівці : Рута, 2002. — 272 с.
73. Тофан В.І., Юрченко К.А. Безпілотні літальні апарати в геодезії та картографії // Геодезія, картографія і аерофотознімання. — 2016. — Вип. 84. — С. 5–15.
74. Лазерное сканирование в инженерной геодезии / О.В. Алексеенко, Д.Ш. Михелев, В.И. Дробышев. — Москва : МИИГАиК, 2010. — 126 с.
75. Федотов Г.А. Инженерная геодезия. — Москва : Высшая школа, 2004. — 463 с.
76. Хлобистов Є.В. Фінансово-економічний механізм природокористування та охорони довкілля в Україні. — Київ : РВПС України НАН України, 2002. — 258 с.
77. Герус Л.В., Сторожик Л.І. Екологічне страхування як інструмент управління природокористуванням у гірничодобувних регіонах // Екологічна безпека. — 2014. — № 2(18). — С. 49–55.

ДОДАТКИ

Додаток А

Оцінка точності вимірювань при визначенні планово-висотного положення пунктів КВА по горизонтах нижче 13

Сторона опорної маркшейдерської мережі	Довжина, м	Середня квадратична помилка виміру відстаней, м	Відносна помилка	Середня квадратична помилка виміру перевищення, м
1	2	3	4	5
NT7-40A–Rp 13	991.722	±0.002	1:495861	±0.003
NT7-41A–Rp 13	1038.140	±0.005	1:207628	±0.008
NT8-36–Rp 13	829.731	±0.002	1:414865	±0.003
NT8-40A–Rp 13	1001.647	±0.002	1:500823	±0.003
NT8-41A–Rp 13	1053.685	±0.004	1:263421	±0.006
NT9-40A–Rp 13	1034.336	±0.002	1:517168	±0.003
NT11-36–Rp 13	908.493	±0.002	1:454247	±0.004
NT11-40A–Rp 13	1072.401	±0.002	1:536201	±0.003
NT11-41A–Rp 13	1126.701	±0.002	1:563350	±0.003
NT5-44–R13	509.800	±0.002	1:254900	±0.002
NT6-43–R13	434.176	±0.001	1:434176	±0.002
NT6-44–R13	555.865	±0.001	1:555865	±0.002
NT6-48–R13	833.904	±0.001	1:833904	±0.002
NT7-44–R13	427.920	±0.001	1:427920	±0.002
NT7-41–R13	383.261	±0.002	1:191630	±0.003
NT7-42A–R13	1084.808	±0.002	1:542404	±0.003
NT8-42A–R13	1103.671	±0.002	1:551836	±0.004
NT8-52–R13	1180.703	±0.003	1:393568	±0.006
NT9-41A–R13	1087.576	±0.002	1:543788	±0.002

NT9-84-Rp 13	3871.814	±0.002	1:1935907	±0.003
NT9-88-Rp 13	4049.903	±0.003	1:1349968	±0.004
NT9-98-Rp 13	3624.114	±0.003	1:1208038	±0.005
NT11-1-Rp 13	3190.720	±0.002	1:1595360	±0.003
NT11-6-Rp 13	2849.397	±0.002	1:1424698	±0.004
NT11-14-Rp 13	2215.017	±0.003	1:738339	±0.004
NT11-16-Rp 13	2098.888	±0.003	1:699629	±0.004
NT11-84-Rp 13	3853.994	±0.002	1:1926997	±0.004
NT11-88-Rp 13	4029.124	±0.002	1:2014562	±0.003
NT11-95-Rp 13	3802.506	±0.002	1:1901253	±0.003
NT11-98-Rp 13	3619.071	±0.002	1:1809535	±0.004
NT11-100-Rp 13	3369.154	±0.004	1:842289	±0.006
NT12-4-Rp 13	2909.152	±0.004	1:727288	±0.006
NT12-10-Rp 13	2410.435	±0.003	1:803478	±0.004
NT12-16-Rp 13	2058.754	±0.003	1:686251	±0.005
NT12-20-Rp 13	1919.503	±0.002	1:959752	±0.003
NT12-94-Rp 13	3792.080	±0.002	1:1896040	±0.004
NT12-95-Rp 13	3771.994	±0.002	1:1885997	±0.004
NT7-25-R 13	1666.030	±0.004	1:416507	±0.006
NT8-25-R 13	1645.446	±0.002	1:822723	±0.004
NT8-27-R 13	1463.841	±0.002	1:731920	±0.003
NT8-32-R 13	1310.822	±0.002	1:655411	±0.004
NT11-20-R 13	1934.451	±0.001	1:1934451	±0.002
NT11-32-R 13	1319.376	±0.003	1:439792	±0.004

ДОДАТОК Б

Оцінка точності вимірювань при визначенні планово-висотного
положення пунктів КІА по горизонтах 13, 14, 15, 17.

Сторона опорної маркшейдерської мережі	Довжина, м	СКП вимірювання відстані, м	Відносна помилка	СКП вимірювання перевищень, м
1	2	3	4	5
HT13-32-Rp13	1345.207	±0.003	1:448402	±0.004
HT13-34-Rp13	1114.112	±0.002	1:557056	±0.003
HT13-36-Rp13	949.481	±0.002	1:474741	±0.003
HT13-40A-Rp13	1101.450	±0.003	1:367150	±0.004
HT13-43-Rp13	1192.484	±0.004	1:298121	±0.006
HT13-53-Rp13	1271.784	±0.002	1:635892	±0.003
HT15-12-Rp13	2245.000	±0.003	1:748333	±0.005
HT15-16-Rp13	1991.631	±0.003	1:663877	±0.005
HT15-18-Rp13	1882.156	±0.005	1:376431	±0.010
HT15-20-Rp13	1811.666	±0.003	1:603889	±0.005
HT15-23-Rp13	1714.590	±0.003	1:571530	±0.005
HT15-27-Rp13	1557.344	±0.002	1:778672	±0.002
HT15-30-Rp13	1475.313	±0.003	1:491771	±0.005
HT15-32-Rp13	1375.012	±0.002	1:687506	±0.003
HT15-34-Rp13	1140.092	±0.001	1:1140092	±0.002
HT15-36-Rp13	984.293	±0.001	1:984293	±0.002
HT15-40A-Rp13	1146.384	±0.002	1:573192	±0.002
HT15-41A-Rp13	1187.010	±0.003	1:395670	±0.004
HT15-43A-Rp13	1219.270	±0.003	1:406423	±0.003
HT15-53-Rp13	1269.358	±0.003	1:423119	±0.004

Rp13-MFC17-2	1080.349	±0.001	1:1080349	±0.002
Rp13-MFC17-3	1435.206	±0.004	1:358801	±0.008
Rp13-MFC17-4	1539.711	±0.002	1:769856	±0.004
Rp13-MFC17-5	1630.533	±0.001	1:1630533	±0.002
Rp13-MFC17-6	1806.852	±0.002	1:903426	±0.003
Rp13-MFC17-7	2002.744	±0.003	1:667581	±0.004
Rp13-MFC17-8	2202.046	±0.002	1:1101023	±0.003
HT 13-1-Rp13	3109.288	±0.004	1:777322	±0.007
HT13-6-Rp13	2669.335	±0.003	1:889778	±0.004
HT13-10-Rp13	2436.130	±0.003	1:812043	±0.005
HT13-12-Rp13	2263.218	±0.003	1:754406	±0.004
HT13-18-Rp13	1914.984	±0.003	1:638328	±0.003
HT13-23-Rp13	1719.386	±0.002	1:859693	±0.003
HT13-27-Rp13	1559.377	±0.004	1:389844	±0.006
HT13-30-Rp13	1446.457	±0.002	1:723229	±0.004
HT13-84-Rp13	3839.830	±0.003	1:1279943	±0.006
HT13-88-Rp13	4000.693	±0.004	1:1000173	±0.006
HT14-84-Rp13	3821.863	±0.004	1:955466	±0.005
HT14-88-Rp13	3979.362	±0.002	1:1989681	±0.003
HT14-98-Rp13	3562.801	±0.006	1:593800	±0.011
HT15-95-Rp13	3660.997	±0.004	1:915249	±0.008
Rp13-MFC17-9	2320.760	±0.002	1:1160380	±0.003
Rp13-MFC17-10	2602.628	±0.004	1:650657	±0.006
Rp13-MFC17-11	3046.311	±0.004	1:761578	±0.006
Rp13-MFC17-12	3620.286	±0.003	1:1206762	±0.005
Rp13-MFC17-14	3835.024	±0.004	1:958756	±0.005

Rp13-MГC17-15	3480.381	±0.002	1:1740190	±0.002
Rp13-MГC17-16	3018.262	±0.002	1:1509131	±0.003
HT13-18-Rp13	1915.009	±0.003	1:638336	±0.004
HT13-64-Rp13	2300.441	±0.002	1:1150221	±0.003
HT13-66-Rp13	2488.473	±0.002	1:1244237	±0.003
HT13-69-Rp13	2676.640	±0.002	1:1338320	±0.003
HT13-95-Rp13	3822.810	±0.002	1:1911405	±0.004
HT13-95-Rp13	3713.819	±0.002	1:1856909	±0.004
HT14-59-Rp13	1787.760	±0.002	1:893880	±0.003
HT14-64-Rp13	2317.127	±0.002	1:1158563	±0.002
HT14-66-Rp13	2494.983	±0.002	1:1247492	±0.003
HT14-71-Rp13	2816.602	±0.002	1:1408301	±0.002
HT14-74-Rp13	3004.749	±0.003	1:1001583	±0.004
HT14-80-Rp13	3546.738	±0.002	1:1773369	±0.004
HT15-04-Rp13	2919.858	±0.005	1:583972	±0.009
HT15-04-Rp13	2919.880	±0.002	1:1459940	±0.004
HT15-57-Rp13	1579.328	±0.003	1:526443	±0.004
HT15-64-Rp13	2342.277	±0.003	1:780759	±0.004
Rp13-MГC17-1	1166.123	±0.004	1:291531	±0.005
Rp13-MГC17-13	3775.476	±0.002	1:1887738	±0.004
Rp13-MГC17-17	2651.765	±0.003	1:883922	±0.004
Rp13-MГC17-18	2482.935	±0.002	1:1241468	±0.003
Rp13-MГC17-19	1788.639	±0.003	1:596213	±0.005

ДОДАТОК В Розташування пунктів КВА на хвостосховищі ПАТ «ІнГЗК»

