

МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. ИВАН РИЛСКИ”, СОФИЯ



МИННОТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ

КАТЕДРА „МАРКШАЙДЕРСТВО И ГЕОДЕЗИЯ“

маг. инж. Ясен Трифонов Прокопов

**МЕТОДОЛОГИЯ ЗА АНАЛИЗ НА ДЕФОРМАЦИИ ПО
БОРДОВЕТЕ И НАСИПИЩАТА
НА ОТКРИТИ РУДНИЦИ**

(на примера на рудник “Асарел-Медет”)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертационен труд за присъждане на
образователна и научна степен **"ДОКТОР"**

Научна област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.8. Архитектура, строителство и геодезия

Докторска програма: Маркшайдерство

Научен консултант:

проф. д-р Станислав Топалов

СОФИЯ, 2021 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Разширен катедрен съвет на катедра „Маркшайдерство и геодезия“ към Миннотехнологичен факултет на МГУ „Св. Иван Рилски“, София, на 28.05.2021 г., съгласно Ректорска заповед № Р-400 от 19.05.2021 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои пред Научно жури, утвърдено със заповед № Р- от 2021 г. на Ректора на МГУ „Св. Иван Рилски“ и ще се проведе на дд. мм. гггг г. от часа в зала..... нафакултет, МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Сектор „Следдипломна квалификация“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, Ректорат, ет. 3, стая № 79, тел. 02/ 80 60 209..

Утвърденото Научно жури е в състав:

1. Проф. д.г.н. Стефан Димовски – председател
2. Проф. д-р Илинка Иванова, външен;
3. Проф. д.ик.н. Андрей Андреев, външен;
4. Доц. д-р Мила Атанасова-Златарева, външен;
5. Доц. д-р Александър Цонков, вътрешен.

Резервни членове:

2. Проф. д-р Юлин Тепелиев, външен;
3. Доц. д-р Аспарух Камбуров, вътрешен.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

1. Проф./доц. д-р/д.т.н. Име Фамилия
2. Проф./доц. д-р/д.т.н. Име Фамилия

Дисертантът е докторант на самостоятелна подготовка към катедра „Маркшайдерство и геодезия“ на Миннотехнологичен факултет.

Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора.

Автор: маг. инж. Ясен Прокопов

Заглавие: Методология за анализ на деформации по бордовете и насипищата на открити рудници (на примера на рудник „Асарел-Медет“)

Тираж: 20 броя

Отпечатано в Издателска къща „Св. Иван Рилски“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, София.

УВОД

Минерално-суровинната индустрия е отрасъл със стратегическо значение за икономиката на всяка държава. Тя е в основата на всички други индустриални направления и важен фактор за икономическата стабилност и енергийна независимост на страната.

Откритият начин на разработване на находищата на полезни изкопаеми доминира все повече и се утвърждава като приоритетен при увеличаването на световния добив. Основните причини са възможностите за внедряване на висока степен на механизация и автоматизация на процесите в откритите рудници.

Много важен елемент от управлението на устойчивостта на откритите рудници е свързан с изследването на наличието и фактическите премествания на скалния масив в района на рудничното поле.

Съществуват различни подходи за реализиране на тази цел. Едни от тях - геодезическите методи при установяване и изследване на деформации - са изградени на базата на използвани в световната практика мониторингови системи.

Причините за възникване на деформациите могат да бъдат различни, а за изследването им са разработени редица методи, както и съответна измерителна апаратура. Подборът на метода зависи от много фактори, като основните от тях са необходимата точност, условията за работа и икономическата ефективност.

С цел по-пълен и качествен анализ на регистрираните деформации е необходимо заедно с измерванията на повърхността, да се извършват и дълбочинни наблюдения в скалния масив. Така се получава информация за поведението на масива в дълбочина с цел локализиране на евентуалната хлъзгателна повърхнина, определяне обема на движещата се скална маса и др.

Актуалност на проблема

Познаването на състоянието на масива или рудника и на протичащите в него процеси предполага вземането на правилни решения относно управлението на устойчивостта му и осигуряване на надеждна експлоатация.

Определянето на деформации дава възможност да се следи поведението на конструкцията на рудника по време на основните дейности, което при опасност от аварийни ситуации позволява и навременна реакция.

Изменението на пространственото положение на наблюдаваните точки, количествено определено в различни моменти от време, дефинира настъпилите промени в състоянието на масива или обекта. Изучаването на тези промени е необходимо за осигуряване на безопасността при работа.

Наблюденията в естествена среда, при конкретни минно-технически и геоложки условия, позволяват достоверна оценка на състоянието и отделните елементи на открития рудник. С развитието на технологиите се откриват нови възможности за разработка на методи за измерване, обработка и анализ, подобряване и оптимизация на съществуващите методи и повишаване на тяхната икономическа ефективност.

Цел и задачи на дисертационната работа

Целта на дисертационната работа е чрез анализа на непрекъснати маркшайдерски наблюдения за един продължителен период от време, с използване на съвременни геодезични и информационни технологии, да бъде предложено оптимизирано прилагане на

автоматизиран мониторинг и следене на деформационни процеси в реално време за условията на открит рудник.

Във връзка с това са и поставените **основни задачи**:

- Описание на основните характеристики, особености и устойчивостта на бордовете при открития добив
- Преглед и анализ на методите за изследване на деформации в открити рудници
 - конвенционални
 - съвременни технологични решения за дистанционни наблюдения
- Дефиниране на основни проблеми при автоматизирания мониторинг на устойчивостта на бордовете
- Анализ на надеждността на данните от първичните измервания, извършени с тотална станция и ГНСС
- Извършване на статистическа обработка с последващ анализ на информативността на признаците
- Оценка на точността на измерванията при наличие на групови премествания на точките и на деформационното поле
- Обработка и интерпретация на резултатите от автоматизирания мониторинг при формиране геоложки зони, за подобряване на методологията за анализ на деформации
- Корелационен анализ на резултатите от измерванията в контактните зони – база за прогнози в поведението на някои точки
- Визуализация и интерпретация на получените резултати

Практическа приложимост

Потвърдена е практическата реализация на системата за автоматизиран мониторинг на деформационни процеси за условията на открит рудник с оценка и анализ, на база статистическа обработка, на състоянието и устойчивостта на бордовете му.

Апробация

Резултатите в дисертационната работа са от реализираните измервания за условията на рудник “Асарел-Медет” и последваща обработка и изследвания, проведени в катедра “Маркшайдерство и геодезия” в МГУ “Св. Иван Рилски”.

Публикации

Основни части от съдържанието на дисертацията, както и анализ на обработени резултати и заключения са поместени в 4 публикации, три от които самостоятелно, а последната в съавторство в сборници и научни издания.

Съдържание

В структурно отношение дисертационната работа съдържа увод, пет глави, заключение, претенции за приноси, публикации във връзка с темата и използвана литература. Изложението е върху 192 страници, като част от текста са 134 фигури и 36 таблици. Използвани и цитирани са 152 литературни източника, от които 55 на кирилица и 97 на латиница. Номерата на формулите, фигурите, таблиците и използваната литература в автореферата съответстват на тези в дисертацията.

1. ВЪВЕДЕНИЕ – ПРИОРИТЕТИ НА ОТКРИТИЯ ДОБИВ

Начините за добив на полезни изкопаеми са съчетание на минни технически средства и безопасни, икономически целесъобразни технологични процеси, за разкриване на полезното изкопаемо, неговото отделяне от скалния масив и транспортиране на земната повърхност. За добиване на подземните богатства се използват различни начини на разработване на находищата, като основните са открит, подземен, подводен и геотехнологичен добив.

Основната цел на откритото разработване на находищата е добиване на подземни богатства с прокарване на открити минни изработки или непосредствено от земната повърхност по най-евтин и безопасен начин. Откритият начин на разработване включва два основни вида работи, изпълнявани на земната повърхност: **откривни** - отделяне на покриващите полезните изкопаеми и вместиращите се в тях скали и **добивни** - изземване на подземното богатство.

1.1. ОСОБЕНОСТИ И ОСНОВНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ОТКРИТИЯ ДОБИВ

1.1.1. Предимства и недостатъци на открития добив

Световната минна практика е доказала **значимите предимства** [2], [22] на откритите рудници, по важните от които са:

- по-високо ниво на комплексна механизация и автоматизация на минните работи и по-благоприятни условия и възможност за най-пълно изземване;
- по-кратки срокове за строителство на откритите рудници и по-голяма интензификация на минните работи, увеличаваща производствената мощност;
- възможност за възстановяване на нарушените терени и тяхната рекултивация в иззетите пространства и насипищата;
- по-добри възможности за автоматизация и дистанционно управление на механизацията и много голяма производителност при ниска себестойност на продукта;
- относително добри и безопасни условия за работещите в рудника и прилагане на системи и средства за оптимално управление на рудника.

Не трябва да се подценяват обаче и **слабите страни** на открития добив:

- не е универсален начин на разработване - ограничават прилагането му дълбочината на залягане и откривката, която трябва да се из земе;
- по-голямо влияние на минните работи върху околната среда;
- замърсяване на въздуха от прах, газове, шумове; нарушаване на земните площи и под насипищата, а атмосферните условия затрудняват работата (дъжд, сняг, студ, мъгли, вятър и др.) на хората и механизацията;
- необходими са големи площи за насипване на откривката и голям обем минно-капитални работи и капиталовложения, които се усвояват за кратък период от време;
- взривните работи са опасни поради значителният сеизмичен ефект, а специфичната отражателна способност на стъпалата на рудника и на насипищата предизвиква негативни изменения на микроклимата.

Посочените недостатъци в значителна степен се покриват от големите технико-икономически предимства на открития добив на разработване на находища пред подземния начин.

1.1.2. Откритият рудник като система и обект на управление

Моделът е средство за познание на обективна действителност и *според начина на изграждане* моделите биват идеални (въображаеми) и технически (материални), в основата на които стои въображаем модел и при които се правят макети на реалните обекти, а *според подхода*, използван при моделирането, се различават физическо, математическо и функционално моделиране.

В минната геомеханика свое определено място заемат и **стохастичните модели**. Те се прилагат тогава, когато скалният масив може да бъде разгледан като дискретна среда.

Откритият добив на подземни богатства и в частност откритите рудници са система, която се създава, развива се, функционира, затихва във времето и евентуално накрая се ликвидира. При всички тези етапи се налага събиране, обработване, представяне и съхраняване на значителна по обем и разнообразие информация, т. нар. “информационно осигуряване”.

За количествена оценка на качеството на информационното осигуряване може да се използва т.нар. **коэффициент на информираност**

$$K_1 = \frac{I_p}{I_n}, \quad (0.1)$$

където I_p е информацията, която е на разположение, а I_n - необходимата информация за решаване на дадена задача [22].

Моделът на **рудника като система** гарантира неговата надеждност и ефективност - отделните съставни елементи, ако излязат от строя не влияят на цялостната работа.

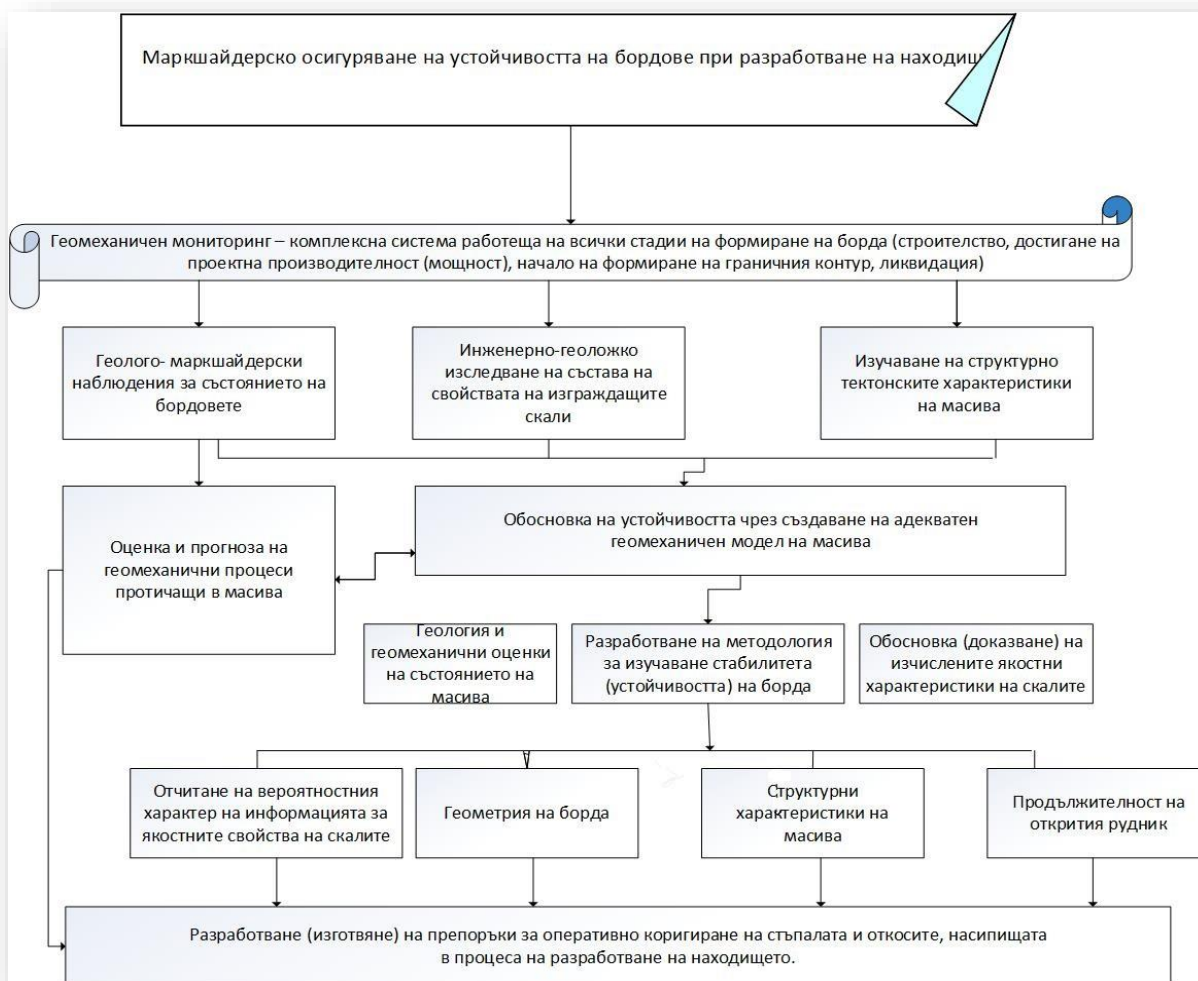
Рудникът е *добивна и динамична система*, в която основните технологични процеси протичат с относително висока скорост и непрекъснато променят обстановката в обекта. Той притежава и основните *характеристики на инерционните системи* - не може да реагира адекватно на бързи промени на макросредата и на допуснати грешки.

Моделът “рудник” е обект на постоянно изучаване, но трудностите при дефиниране на закономерностите от природната среда, определят и *стохастичния характер* на системата.

1.2. УСТОЙЧИВОСТ НА БОРДОВЕТЕ – РОЛЯ, МЯСТО И ЗНАЧЕНИЕ В ПЕРСПЕКТИВНОТО РАЗВИТИЕ НА ОТКРИТИЯ ДОБИВ

С устойчивостта на откосите на стъпалата и бордовете на открития рудник са свързани граничните стойности на наклоните им и граничната дълбочина на разработване. При рудниците с голяма дълбочина, ако се намали ъгълът на бордовете с 2° до 4° , обемът на откривните работи може да се увеличи с милиони кубични метри [49].

Управлението на състоянието на масива е свързано с обезпечаване на устойчивостта на откосите, а концепцията за **цялостен геомеханичен мониторинг** (фиг.4) предопределя системния подход към решението на всички останали задачи и въпроси [62].



фиг. 4 Цялостен геомеханичен мониторинг - структурна схема

1.2.1. Устойчивост на бордовете в открити рудници и кариери - проблеми

Определящо при дефиниране на устойчивостта на откосите в откритите рудници и кариери е **способността им да противостоят** на различни външни сили като същевременно се запазват функциите им за продължително време [39].

Редица фактори като съществуващи геоложки нарушения, наличие на подземни води, здравината на скалната маса, геотехнически параметри, динамични сили, геометрията на склона и др. пораждат дисбаланса на природните сили и допринасят за нарушаване на равновесното състояние. **Свлачищата** най-често са резултат на несъобразени с конкретната инженерно-геоложка обстановка параметри на откривните и добивните минни работи.

1.2.2. Условия и фактори влияещи върху устойчивостта на откосите

Природните дадености и условия, както и техногенните им изменения в резултат на водене на открити минни работи, са в основата на устойчивите ъгли на стъпалата и бордовете в откритите рудници и кариери. **По-важните природни условия са:**

- инженерно-геоложки, определящи стабилното състояние на масива;
- климатични - интензитет на валежите (вкл. снежни), релеф и температурни промени;
- хидрогеоложки - подземни води, хидростатичен и хидродинамичен натиск породен от понижаване на нивото на подземните води, излужване, суфозия на скалите.

Технологичните фактори са доста по-разнообразни и разнородни:

- начин на разкриване на рудничното поле и посока на водене на минните работи (за предпочитане перпендикулярно или косо на нарушенията);
- интензивност на минните работи;
- вид на транспорта - автомобилен, лентов и железопътен (не се използва вече);
- условия за оформяне на насипищата и схеми за насипване;
- системата за отводняване, начинът за провеждане на ПВР;
- формата на рудника (за предпочитане кръгла) и линията на откосите.

1.2.3. Методи за изчисляване устойчивостта на откосите

За осигуряване устойчивостта на откосите **най-важни** са ъгълът на откоса, коефициента на сигурност и изборът на изчислителна схема. *Формата на борда и условието за устойчивост на скалите* от друга страна, са **двамата основни фактора** за определяне на ъгъла на откоса. Възникващите напрежения и действащите сили са определящи за двете групи методи, които се прилагат.

Видове методи, според факторите, които ги пораждаат

- визуални - регистрация на видими на повърхността нарушения, напуканост и др.;
- изчислителни - определяне на количествени оценки по резултат от измервания на хоризонтални и вертикални премествания, извършени най-често по профилни линии (наблюдателни станции);
- геоложки и хидрогеоложки - чрез проследяване на структурни промени в масива, на пукнатини, на нивата на подземните води и др.;
- геофизични – чрез регистриране на изменения във физичните полета чрез ултразвукови или радиосигнали.

Видове методи според подхода при решението и реализацията на оценките

Всички методи се основават на теорията за граничното равновесие на сипеца среда, като за такава в механиката на мулдата се приема обикновено зоната на обрушаване.

- методи, на база определени допускания (интуитивни)

❖ графични методи

Най-популярен е **методът на Маслов (Е_р метод)**, използван при относително еднороден скален масив, при който не се прогнозира мястото на хлъзгателната повърхнина.

❖ аналитични методи

За първи път задачата за оценка на устойчивостта на откосите с помощта на теорията на граничното равновесие е решена през 1942 г. от В. В. Соколовски и С. С. Голушкевич, съгласно условието за гранично напрегнато състояние, записано във вид на съпротивление на изместване τ по Мор-Кулон (Mohr-Coulomb)

$$\tau = c + \frac{N}{l} \operatorname{tg} \varphi, \quad (0.2)$$

където N е нормалната сила, действаща на хлъзгателната (свличаща се) повърхност, l – дължината на тази повърхност, c – сцеплението (кохезия) на почвата (скалата), а φ – ъгълът на вътрешно триене.

- методи, основани на анализа на граничното равновесие (Limit Equilibrium Methods - LEM)

❖ метод на ламелите

В този случай оценката на устойчивостта на откоси се прави чрез разделяне на свлачищното тяло на вертикални ивици (ламели), при което коефициента на устойчивост (**FOS - Factor of safety**) се приема един и същ за всяка ивица.

Популярен в това отношение е **методът на Фелениус** (шведски метод), в основата на който лежат няколко предположения:

- повърхнината на плъзгане е кръгово-цилиндрична;
- кохезията е разпределена равномерно по цялата повърхнина на плъзгане;
- силите на кохезията действат едновременно по цялата повърхнина на плъзгане.

При сравнително еднородни разновидности може да се използва **метода на Бишоп** (рутинен метод) с итерационна формула за коефициента на устойчивост и грешка обикновено по-малка от 2 % и рядко надвишаваща 7 % [127].

Своето значимо място са намерили и методите **на Маслов – Берер** (метод на хоризонталните сили) и **методът на общото гранично равновесие** (GLE - Global Limit Equilibrium), общата формулировка на който е разработена от Фредлунд през 70-те години, методите **на Янбу** (Janbu) и **Шахунянц**, където предполагаемият масив на хлъзгане се разделя пак на отделни части (вертикални ламели), а решението може да бъде и графично.

Основен проблем при гореизброените методи е, че *методологията има детерминистичен характер*. Коефициента на безопасност се определя при определени допускания и приети стойности на входящите параметри, което води до субективни оценки.

❖ метод на монолитното тяло

Това е *универсален метод* и намира приложение не само при оценка устойчивостта на бордовете в открити рудници, като призмата на обрушаване се приема като едно монолитно тяло, а плъзгателната повърхнина се задава или като равнинна, или по-често като кръгово-цилиндрична повърхнина.

Коефициентът на устойчивост F (safety factor) (ползват се и други буквени означения, напр. η), който се използва при тяхното прилагане, се определя от отношението

на силите на задържане (триене и сцепление - съпротивителни сили) $\Sigma M_{\text{зад}}$ към силите на свличане (движение - активни сили) $\Sigma M_{\text{дв}}$

$$F = \frac{\Sigma M_{\text{зад}}}{\Sigma M_{\text{дв}}} . \quad (0.3)$$

У нас, откритите рудници са проектирани със стойности на коефициента на устойчивост между 1.2 и 1.3 (в световната практика, все по-често се работи с коефициент на устойчивост между 0.9 и 1.1), Изземването на подземните богатства при неоправдано висок коефициент на устойчивост има значителен негативен ефект.

Методи на основата на математическия анализ

В световната практика, за оценка на устойчивостта на откоси, те са известни под общото наименование **LAM (Limit Analysis Method)**.

Методът на дискретната оптимизация (DLO - Discontinuity Layout Optimization) [127] се извършва с методи на линейното оптимизиране.

Не по-малко популярни са и **методът на крайните разлики** (FDM - Finite Difference Method) [57] и **методът на крайните елементи** (FEM - Finite Element Method) [13]. Последният е числова техника, използвана за извършване на анализ на крайни елементи (FEA - Finite Element Analysis) на всеки даден физически обект. Обикновено се прилагат различни софтуерни пакети - ANSYS (ANalysis SYStem) на ANSYS, Inc. (USA), ABAQUS, LS-DINA, ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis), SSAP (Slope Stability Analysis Program - софтуерен продукт с различни версии, който се разработва и непрекъснато обновява от 1991 г.) и др.

При друга голяма част от методите средата може да се приеме дискретна (несвързана) - **метод на дискретните елементи** (DEM - Discrete Element Method) [110] или **метод на отделните елементи** (Distinct Element Method).

Прогнозни и комбинирани методи

Вероятностният метод също е начин за оценка устойчивостта на бордовете и се прилага когато се използва якостта на срязване на скалите на база многократни изпитвания, оценяващи промените в свойствата им.

За прогнозиране и надеждни резултати чрез симулиране на данни, **методът Монте Карло** [23] е с безспорен приоритет за оценка на стабилитета на откосите. В този случай крайният резултат е чувствителен към броя на изпитванията (итерациите). Оптималния брой обикновено се постига, когато разликата между две последователни стойности на коефициента на устойчивост (F) примерно е под 5 %.

Методите, основани на граничното равновесие успешно се съчетават с комбинацията FEM-DEM, при което са изпълнени не само условията за равновесие, но и за общото преместване.

В днешно време **ГИС-технологиите** позволяват по-лесно изготвяне и използване на моделите и също намират своето място при анализа на резултатите от измервания, създаването на числени модели и управлението на бази данни.

Едно от важните и все по-активно развиващо се направление в областта на оценката на устойчивостта на откоси е **триизмерния анализ**, т.е. решаването на т.нар. **обемна задача**. Създаването на 3D-модели е широко разпространен метод, както при решаването на редица практически инженерни задачи - например числено моделиране на напрегнатото

деформирано състояние на масива, така и за решаване на широк спектър екологични и хидрогеоложки задачи. Основната предпоставка при изготвянето на тези модели е, че *средата е еднородна. Съществено предимство* при 3D анализа за оценка на устойчивостта на откосите е, че този вид изчисления позволява да се прогнозира развитието на свлачищен и/или деформационен процес не само в дълбочина на масива, но и в план.

Изводи

1. Откритият добив на подземни богатства притежава редица предимства пред подземния, основно свързани с по-голямата производителност при сравнително по-ниска себестойност, относително по-добрите и значително по-безопасни условия и др. Слабостите са свързани преди всичко с промените в околната среда.
2. Откритият рудник е специфична система, при чието управление следва да се отчитат редица особености: тя е добивна и стохастична системата с динамичен характер, притежаваща инерционност; тя е кибернетична, сложна система, с характерна цялостност, където се използват различни области на знанието.
3. При решаване въпросите за управление развитието на минните работи се очертават няколко качествено различни етапа: събиране, обработка, анализ и избор на изходните данни; подготовка за решенията; вземане на решения и реализиране на взетите решения в три взаимно свързани насоки: геоложка, маркшайдерска и технологична.
4. Деформациите и тяхното определяне е в две основни насоки (цели) – осигуряване на безопасност на съоръженията и прогнозиране и управление на процеса, където в математическите модели се задават определени числени характеристики по отношение устойчивостта.
5. Вероятностният характер на изходните данни за определяне на устойчивостта на откосите обаче изисква да се използват не детерминирани, а вероятностни методи с оценка на достоверността на изходната информация.
6. Коректността и достоверността на резултатите при моделизацията и изчисляване на устойчивостта на откосите може значително да бъде повишена, при комбинираното използване на различни методи, основани на различни принципи, когато между тях има добра сходимост.

2. МЕТОДИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДЕФОРМАЦИИ

Изследването на деформации е неразделна част от експлоатацията на крупните инженерни съоръжения и минни обекти. Под **деформация** на дадено съоръжение или обект се разбира сравнително малко по абсолютна стойност преместване на отделни негови части една спрямо друга или преместване на цялото съоръжение [54].

Природните и техногенните фактори са причина за деформационните процеси, а следенето на характерни точки от обекта дефинира хоризонталните и вертикалните премествания (респективно пространствени), които могат да бъдат равномерни и неравномерни, затихващи и незатихващи. Деформациите се обработват като абсолютни или относителни с определена цикличност.

1.3. ТОЧНОСТ И ПЕРИОДИЧНОСТ НА ИЗМЕРВАНИЯТА

За предварителна обосновка на точността на измерванията като критерий най-често се използва средната квадратна грешка (СКГ) на съответната величина.

При определяне честотата на измерванията при изследване на деформации [12], се *оценява връзката* между интервала от време между две последователни измервания и определените премествания от условието:

$$\Delta t_{i,i+1} \Delta Q_{i,i+1} = k, \quad (0.4)$$

където $\Delta t_{i,i+1}$ е интервалът от време между два последователни цикъла с номера i и $i+1$, $\Delta Q_{i,i+1}$ е преместването за интервала от време $\Delta t_{i,i+1}$, а k е коефициент.

Като правило използваните методи трябва да осигуряват бързо обработване на измерванията и определяне на настъпилите деформации.

2.2. КОНВЕНЦИОНАЛНИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИ МЕТОДИ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ МИННИ ОБЕКТИ РАЗРАБОТВАНИ ПО ОТКРИТ СПОСОБ

Деформациите се определят с две основни цели: осигуряване на безопасността на съоръжението и установяване влиянието на различни фактори, с оглед прогнозиране и управление на процеса.

Методи за измерване на векторите на преместване - **изисквания**:

- да установяват деформации по-малки от „критичните” деформации;
- да бъдат елиминирани или сведени до минимум систематичните грешки;
- измерванията да се извършват през достатъчно малък интервал от време и през целия срок на съществуване на обекта;
- наблюденията да включват обективен контрол на точността и на неподвижността на изходните точки.

Изборът на метод и точността на измерване могат да се определят и от други изисквания, но *винаги е свързан с минималните стойности на наблюдаваните премествания*, а наблюденията се извършват от **“наблюдателна станция”**.

2.2.1 Определяне на хоризонтални деформации

Понастоящем могат да се измерват деформации на всяка точка от открития рудник, включително и от насипищата, с прилагане на относително ограничен брой методи.

Хоризонтални деформации се появяват по направление, лежащо в хоризонтална равнина (перпендикулярна на направлението на силата на тежестта), а при откритите рудници значимите премествания се очакват в посоката перпендикулярна на стъпалата.

Тригонометричен метод

Според вида на измерваните величини тригонометричните мрежи могат да бъдат *ъглови, линейни и ъглово-линейни*, като последните са най-често използваните. Освен чрез тях, тригонометричното определяне може да се извърши и с *прави и обратни засечки* или *полигонометрични ходове* (мрежи).

При открити рудници и кариери тригонометричният метод най-често се прилага когато те имат значителни размери [22]. Мрежата се развива от изнесени извън зоната на очакваните деформации станции до стъпалата на рудника, а формата трябва да осигурява оптимално ориентиране на т. нар. *елипси на грешките*.

Створен метод

Створният метод се прилага при обекти, които имат *форма по-близка до линейната*, при което отклоненията на наблюдаваните точки се определят спрямо дадено направление. Изходното направление обикновено е успоредно или съвпада с оста на обекта (съоръжението), а деформациите са в перпендикулярна посока.

В минните обекти с открито разработване, ако изобщо се прилага, практическата реализация на створния метод се извършва с изследване на деформации по профилни линии.

Полярен метод

В открити рудници и кариери полярният метод се прилага за определяне на деформации при наличие на *голям брой контролни репери*, разположени в профилни линии или на отделни гнезда и ограничен брой станции.

При използването на *моторизирана тотална станция* (формално следяща система) лесно се осигурява последователно проследяване (“сканиране”) на реперите. Обработката в реално време дава нагледност за състоянието на бордовете на рудника – евентуално сближение (конвергенция) или друго разместване.

2.2.2. Определяне на вертикални деформации

Под **вертикални деформации** се разбират всички промени в състоянието на един обект/съоръжение, настъпващи по направление на силата на тежестта. **В зависимост от посоката** те са деформации на потъване (слягане) или повдигане (издуване).

Определянето на вертикалните премествания се извършва от *височинна инженерно-геодезическа мрежа*, в която освен контролни репери (в зоната на деформационния процес) се включват още и изходни репери от височинната опорна мрежа.

В минната практика при открития добив за определяне на вертикални деформации са намерили приложение основно два метода.

Геометрична нивелация

Измерванията при този метод са бавни и трудоемки. Нивелацията при изследване на деформации обикновено е прецизна, като за целта се използват либелни, компенсаторни или електронни нивелири, като последните са с основно приложение в практиката.

Методът има *ограничено приложение* в откритите рудници, главно поради трудностите при прехода от стъпало на стъпало и значителните вибрации при работа на тежката механизация [22]. *Практическата реализация* на метода е в няколко направления:

- дългогодишни наблюдения на целия район около рудника, където се добива;
- регистриране на слягания или издувания след провеждане на взривни работи или придвижване на тежката техника;
- установяване на вертикални премествания на терена в близост до работните бордове на рудника, заради предварителното осушаване.

Тригонометрична нивелация

В откритите рудници и кариери методът на **тригонометричната нивелация** е *основен метод* за определяне на превиишения.

Тригонометричната нивелация е значително по-удобна от геометричната, особено при големи превиишения, но е с *по-ниска точност*. Това се дължи на факта, че независимо от точността на използваните инструменти, вертикалната рефракция „натоварва“ зенитните ъгли със значителни грешки. Успешно се прилага и при свлачищни участъци, в случаите когато изискванията за точност не са особено високи.

2.2.3. Числени характеристики и оценки за деформационните процеси

Обработката на резултатите от измерванията има пряко отношение към проследяване и прогнозиране на деформациите. Тя може да се извърши при наличие или отсъствие на систематични грешки, с отчитане на факта, че става дума за разнородни измервания.

Под формата на оценки за един репер могат да се определят преместванията в хоризонтално и вертикално отношение, векторите на преместване в план и в пространството, скорости на движение, относителна деформация и промяна в наклона и др.

Установяването на закономерностите при проследяването на един деформационен процес има вероятностен и рисков характер, тъй като различни процеси и явления в обекта/съоръжението могат да доведат до едни и същи прояви на повърхността, а математическите модели, които се съставят трябва да отговарят на физическата същност на явленията.

2.3. СЪВРЕМЕННИ ТЕХНОЛОГИЧНИ РЕШЕНИЯ

Възможността да бъдат наблюдавани много точки, включително целия обект, както и тяхното поведение във времето, позволява изработването на модели на деформационния

процес и улеснява решаването на редица задачи, касаещи прогнозирането и промяна на технологичната схема на разработване.

По своята същност това са дистанционни методи с автоматизирана регистрация на резултатите от измерванията, лесна последваща обработка и онагледяване. Тяхното приложение до голяма степен улеснява следенето на деформационни процеси в откритите рудници и кариери.

2.3.1. Глобални навигационни спътникови системи за определяне положението на точки

Според обхвата си съвременните системи за навигация могат най-общо да бъдат групирани в две **направления** [43], [96]:

- глобални - NAVSTAR GPS (САЩ), ГЛОНАСС (Русия), Galileo (Европейски съюз) и BeiDou (Big Dipper/COMPAS) (Китай), покриващи цялата Земя;
- регионални – за определяне положението върху ограничени части от земната повърхност - QZSS (Япония); IRNSS/NAVIC - 7 спътника, покриващи територии до 1500 km от Индия; SBAS - под различни наименования и варианти на реализация за Европа и отделни държави.

Видове ГНСС методи. Предимства и недостатъци

ГНСС методите могат да се класифицират според различните критерии [17]:

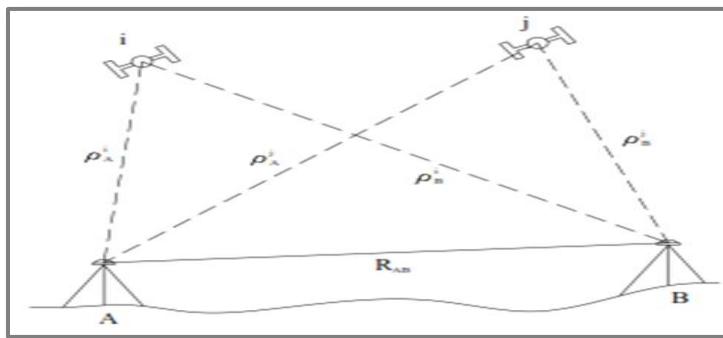
- в зависимост от положението на приемника - статични и кинематични (неподвижен или подвижен приемник);
- в зависимост от използвания ГНСС сигнал - кодови и фазови;
- в зависимост от начина за обработване на измерените величини - автономни, диференциални, относителни или за прецизно единично определяне PPP (Precise Point Positioning);
- в зависимост от момента на получаване на резултатите – в реално време или с последваща обработка и др.

Основните **преимущества** на ГНСС технологиите са:

- осигуряване на висока точност, достатъчна за много видове геодезически дейности;
- висока производителност, без да е нужна видимост между точките;
- почти пълна независимост от метеорологичните условия;
- определяне на пространствени координати при висока степен на автоматизация, с възможност за генериране на модели и др.

Недостатъците основно се свързват с невъзможността за работа в подземни условия и в закрити или ограничени пространства, както и при недобра видимост към спътниците.

Структурата на спътниковите сигнали, определянето на координати от псевдоразстоянията, на база кодови и фазови измервания, както и елиминирането на грешки чрез моделите на закъснение са обстойно разгледани в дисертацията. Фазовите измервания по своята същност са относителни, заради единия фиксиран приемник, а векторите се изчисляват на база фазови разлики, с различни възможности за комбиниране (фиг. 28).



фиг. 28 Комбинации при фазовите разлики

Технология и методи за измерване с глобални навигационни спътникови системи

За геодезическата практика основно приложение намират фазовите методи в различни варианти на реализация.

❖ статичен метод

Векторите и точността, с която те са определени се получават при последваща обработка, като по време на измерването между приемниците няма връзка. Те работят едновременно и автономно, а продължителността на измерването зависи основно от разстоянието между точките. Разновидност на тези измервания е бързият статичен метод, при който единият приемник (приет за референтен) работи на точка с известни координати, а другият (подвижен) последователно се премества на новоопределяеми точки.

Основен недостатък на този метод е, че няма възможност за филтриране на некачествени сигнали, поради малкия брой наблюдения.

❖ кинематичен метод

Кинематичният метод на измерване е относителен метод, при който отново има референтна станция и друг подвижен приемник.

Една от разновидностите на метода е измерване в реално време - RTK (Real Time Kinematic), при който от разликите между измерените и геометричните разстояния в референтната станция се изчисляват т. нар. RTK корекции, като измерванията в реално време са силно зависими от начина за предаване на данни от базовата станция. Методът RTK осигурява точност в реално време от порядъка на 2-3 cm (за разстояния до 10 km тя е 1 cm + 2 ppm), резултатите от измерванията са налични веднага, но за определяне на деформации няма особено значение заради малката точност.

Друга разновидност е PPK (Post-Process Kinematic) - кинематичен метод с последваща обработка, при който технологията е същата, а основната разлика е от доста краткото времетраене за наблюденията в подвижните приемници – от порядъка на секунди. Точността, която се осигурява е сантиметри (може да достигне до mm), а основния проблем е невъзможността за работа в реално време.

Добра алтернатива на ГНСС измерванията е осъществяването им с **мрежова инфраструктура** и използването на мрежови **относителни** и **диференциални** методи.

Грешки и точност при спътниковите измервания

В зависимост от използваната апаратура, методиката за обработка на данните и редица други фактори, точността на спътниковите измервания варира от няколко милиметра до десетки метри.

Измерените кодови и фазови псевдоразстояния са повлияни както от систематични, така и от случайни грешки, като повечето от систематичните грешки могат да бъдат моделирани или елиминирани и чрез подходяща комбинация на измерените величини.

Грешките при спътниковите измервания [56], [59] се систематизират като **операторски, инструментални** (приемник и антена) и под влияние на **околната среда** (йоносферни и тропосферни смущения, многопътност, отслабване на сигнала, електромагнитни смущения и др.).

Към тях трябва да се добавят и грешките от *синхронизацията* на времевите скали (на спътника и приемника), от *спътниковата орбита*, както и от *взаимното положение* на спътниците.

За целите на навигацията и когато не е необходима висока точност, кодовите измервания осигуряват няколко m, а диференциалните кодови измервания са в интервала от 20 cm до 1 m при къси бази (20-30 до 80 km). За прецизни геодезически дейности *предпочитани са относителните фазови измервания*, осигуряващи милиметрова точност.

Статичното определяне на относителното положение с измерването на фазата на носещата честота е най-точният метод за определяне на положението, при което може да се достигне милиметрова точност, дори и при много дълги бази.

Мониторингът чрез ГНСС приемници е удачен вариант за големи рудници, диаметърът на които надвишава 1 km, където грешките от пречупване и насочване започват да ограничават ефективността на общите измервания от станцията. Един добър вариант за проследяване на 3D деформации на минни обекти с голяма площ са *непрекъснато работещите референтни станции* (CORS - Continuously Operating Reference Station) [89]. Те трябва да са интегрирани с глобалните IGS станции, за да се гарантира стабилността им и да се контролира качеството на данните.

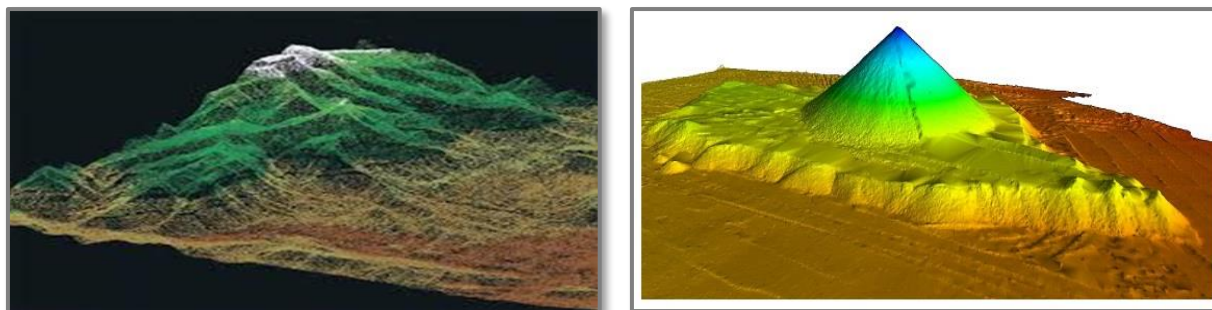
Специално за откритите рудници, независимо от усъвършенстването на методите, измерването на деформации в реално време (кинематични измервания с или без въвеждане на диференциални поправки) среща значителни затруднения при практическата реализация и не е приоритетен подход.

2.3.2 Лазерно сканиране

Лазерното сканиране е технология за дистанционно наблюдение, която позволява получаване на 3D модел на заснемания обект. Пространствената моделизацията на терена с наземни методи за лазерно сканиране е модерен начин за възпроизвеждане на естествената повърхност на Земята с висока точност и почти пълна автоматизация [74].

Наземното лазерно сканиране (TLS - Terrestrial Laser Scanning), популярно още и като **технология LiDAR** (Light Detection and Ranging), се използва за проследяване на деформации и премествания (движения) на земната повърхност и обекти върху нея във времето и пространството. Особено предимство е и интуитивността на данните, като всяка

точка може да съдържа реален цвят, което превръща данните от сканиране в лесно разпознаваеми и разбираеми (фиг. 32, 33).



фиг. 32 и 33

Лазерно сканиране - обхват, възможности, реализация

Наземните лазерни скенери са безконтактни измервателни устройства, които създават плътни облаци от точки и имат възможност за завъртане **около двете оси**.

Качеството на отразения сигнал може да се даде с цвета на пиксела в тонове на сивото (**grayscale**), което улеснява дешифрирането:

- при силно отразяващи повърхности - светлосив пиксел;
- при силно абсорбиращи - тъмносив пиксел;
- при липсата на отражение - черен пиксел.

Според принципа за измерване на разстоянието лазерните скенери се разделят на:

- импулсни;
- фазови.

Фазовите лазерни скенери, имат по-висока разделителна способност и точност, а създаването впоследствие на 3D модел на заснетия обект или територия минава през всички етапи аналогични на изработването на числени модели. Допълнителен етап тук е т. нар. **геореферирание**.

Лазерното сканиране може да бъде и във вариант въздушно, при монтиран скенер на борда на безпилотни летателни апарати (UAV - Unmanned Aerial Vehicle).

Грешки и точност при TLS технологията. Тенденции

При наземното лазерно сканиране, както при конвенционалните геодезически измервания, грешките, които се допускат са в няколко направления – **инструментални**, от **външните условия** и от **геометрията**.

Точността при измерванията зависи преди всичко от **факторите**, които имат **пряко влияние**. Заради безпризменото измерване, трябва да се отчита *грападостта на отразяващите повърхности* както и тяхната *отражателна способност* (албедо). Интензитетът на отразения сигнал зависи също и от *неравностите по терена* (интерференционен ефект) и *ъгъла на падане на лазерния лъч* (идеалния случай е перпендикулярното направление).

Косвено влияние върху измерванията (и то неблагоприятно) оказва наличието на *външни светлинни ефекти* – изкуствени светлинни източници, отблясъци и др.

Състоянието на атмосферата (вятър, влага, температура, атмосферно налягане) също е важен фактор, а макар и в по-малка степен влияят температурата на повърхността на обекта и свойствата на материалите в неговия състав.

При разделителна способност около 2-3 mm/50 m отделни точки могат да се определят с точност *до 10 mm по положение*, а разстоянията с грешка 2-5 mm при фазовите и 2-15 mm при импулсните лазерни скенери. Бързината при сканирането със стотици хиляди точки за много кратко време е без конкуренция при 3D моделирането. TLS технологията е ефикасен инструмент за идентифициране на свлачища или други непристъпни области, при което точността е по-ниска за отделните точки, но позволява да се постигне *много по-подробно моделиране на цялата повърхност*.

Изводи

1. Методите за измерване на векторите на преместване трябва да отговарят на определени изисквания, като установяват деформации по-малки от т. нар. “критични” и да включват обективен контрол на точността и на неподвижността на изходните точки
2. Комплексният подход, при който освен геодезическа информация се използва и геоложката, хидрогеоложката и тази от тектониката на масива е в основата на текущите оценки и числени характеристики и дългосрочните прогнози за развитието на деформационните процеси.
3. С характерните си особености спътниковата навигация може при определени условия да се използва за определяне на деформации, а непрекъснато работещите референтни станции и методът RTK (точност 2-3 cm) позволяват генерирането на ранни предупреждения (съобщения) за опасност.
4. За прецизното определяне на векторите на преместване (милиметрова точност) се използват само статичните измервания с основен проблем преходът между отделните стъпала, както и заснемането на точки върху самите стъпала.
5. Наземното лазерно сканиране, като друг вариант за технологично решение позволява изработването на прецизни теренни модели, с много висока степен на подробност, върху значителни по своите размери площи, а необходимото време за заснемане е без аналог по отношение на другите методи, с точност съпоставима с тази на тоталните станции.
6. Голяма част от разгледаните фактори, влияещи на точността, могат да бъдат ограничени или премахнати чрез избор на подходящо време за сканиране или подходящи условия, а възможността да се достигне милиметрова точност позволява данните от TLS технологията да се използват както за ранно известяване в откритите рудници, така и за следене на деформационни процеси, особено в комбинация с ГНСС и моторизираните тотални станции.

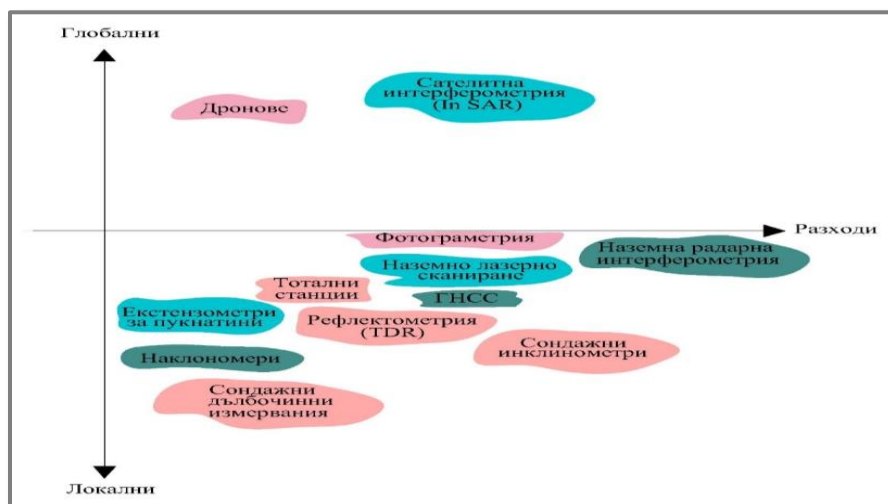
3. СИСТЕМА ЗА АВТОМАТИЗИРАН МОНИТОРИНГ НА УСТОЙЧИВОСТТА НА БОРДОВЕТЕ И СЛЕДЕНЕ НА ДЕФОРМАЦИОННИ ПРОЦЕСИ В ОТКРИТИ РУДНИЦИ

3.1. ПРАКТИЧЕСКА РЕАЛИЗАЦИЯ

3.1.1. Обобщение на методите за наземен мониторинг

Използването на един или друг метод основно зависи от неговите характеристики, предимства и недостатъци, както и от мотивите за неговото прилагане (бързина, точност, икономическа ефективност и др.) [111], [124].

Начините за осъществяване на наземния мониторинг при минни обекти за открит добив могат да бъдат класифицирани в две направления, имайки в предвид и разходите по тяхната реализация – **глобални** и **локални** (местни) [118] (фиг.43).



фиг. 43 Методи за наземен мониторинг и средствата за тяхната реализация

При локалните наблюдения се следи поведението на отделни точки или на относително малки участъци от мината, а за разлика от тях, глобалният мониторинг оценява и околността около нея като цяло.

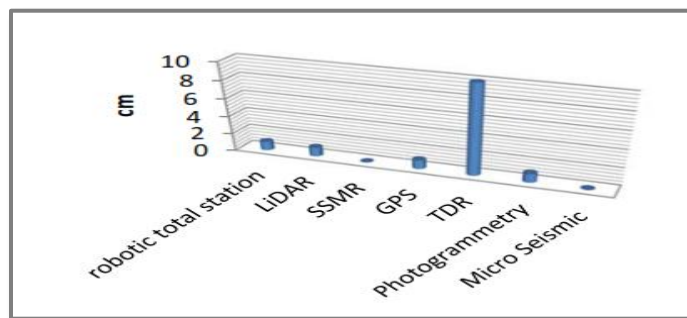
Глобалните навигационни спътникови системи са добро решение за всички открити рудници с диаметър на котлована над 1 km, тъй като определят отделни точки, а проблемът на *наземното лазерно сканиране* е, че не се определят дискретни точки, а се получава облак от тях, от който се генерира повърхността.

Чрез фотограметричното заснемане също могат да бъдат моделирани повърхнини, особено бързо и лесно при използване на радиоуправляеми или дистанционно пилотирани авиосредства - *безпилотни летателни апарати* или *дронове*.

Като най-перспективно осигуряване на системата за мониторинг са *тоталните станции* с техните два основни компонента – наблюдаваните точки (репери) и самите те. Всяка точка се определя с много висока точност със своите пространствени координати. Измерванията са един непрекъснат процес, при което от създадения огромен масив от данни се определят както абсолютни, така и на относителни премествания [82].

Наземната радарна интерферометрия, популярна и като SSMR (Slope Stability Mining Radar) също е за локални наблюдения, както и TDR (Time Domain Reflectometry), а микросеизмичният мониторинг е изключително прецизен на база регистрираните сеизмични вълни при промени в скалния масив.

Ориентирувчната точност при тези методи е до няколко см (фиг.44).



фиг. 44 Точност при методите за локален мониторинг

3.1.2. Реални приложения

Изискванията за точност за нуждите на минното дело са много по-снизходителни в сравнение със съответните им за други строителни работи. Точност от порядъка на 10 см е в повечето случаи достатъчна, ако става дума за абсолютно позициониране. Ако обаче трябва да се следят промени (свличане на склон), скорост на преместване или да се правят прогнози, тогава тя става многократно по-висока (милиметрова).

Едни от най-големите открити рудници в Америка като *Bingham Canyon Mine*, *Morenci Mine*, *Sierrita mine* използват и разчитат на радарната интерферометрия и роботизирани ТС.

У нас в комплексът “Мини Марица-изток” за заснемане на насипищата се прилага лесен и не много скъп начин - *фотограмметрия с използване на БЛА (UAV)*. В откритите рудници “Елаците-Мед” и “Асарел Медет” през последните години са изградени **най-добрите мониторингови системи** за цялостно проследяване на деформационни процеси - комбинация от роботизирана ТС, ГНСС приемници и линейни радари.

3.2. ИНСТРУМЕНТАЛНО ОБОРУДВАНЕ

3.2.1. Радиолокационни наблюдения на земната повърхност

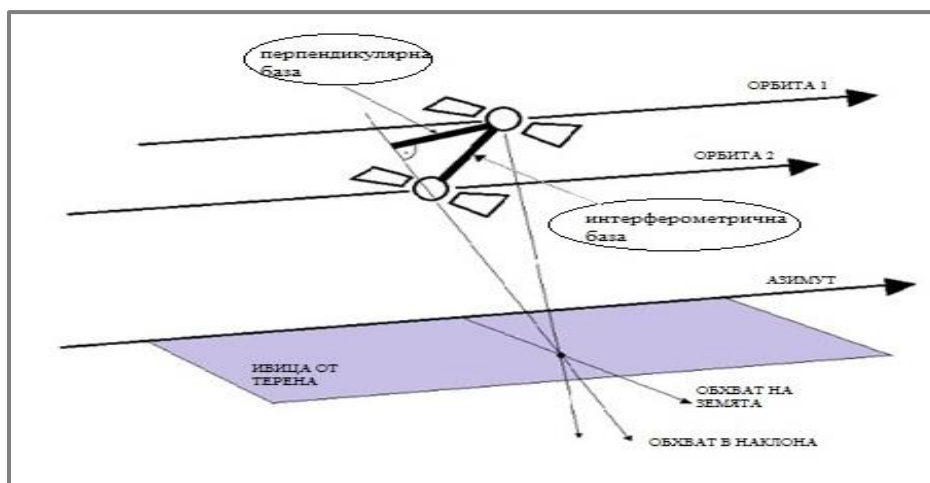
Пасивните сателитни системи (оптични системи) регистрират отразеното от земната повърхност електромагнитно излъчване на Слънцето под формата на безброй независими светлинни вълни или фотони, а при *активните* спътникови системи, като радара, се изпраща сигнал към земната повърхност и се измерва сигнала, който е отразен. Така се събират хиляди изображения за различни процеси и явления на земната повърхност.

Космическите микровълнови радиолокационни системи със синтезирана апертура (Synthetic Aperture Radar-SAR) са изключително подходящ инструмент за мониторинг на земната повърхност. Дистанционното измерване на динамични във времето сигнали и техните параметри, съхранението и обработването им в реално време са част от някои техни значими предимства [20]. Чрез прилагане на SAR системите в интерферометрията се

генерират тримерни изображения на наблюдаваните обекти, като се използва амплитудната и фазова информация [106].

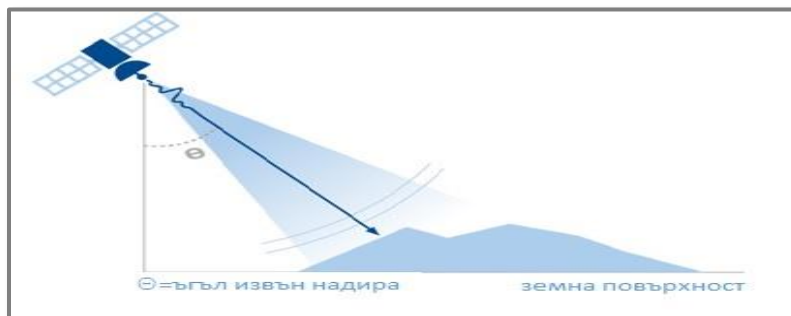
Принцип на действие на InSAR технологията

Сателитната радарна интерферометрия е метод на измерване, който използва *ефекта на интерференция на електромагнитните вълни*. Основната идея на метода е да се формира интерферограма, която е резултат от наслагването от две радарни изображения на една и съща територия (фиг. 55) [30].



фиг. 55 Геометрия на сателитните наблюдения с две антени

При InSAR **координатната система е с три измерения** - по линията на полета (азимута), по разстояние от антената до целта (напречно на направлението на движение) и стойността на фазата на всеки пиксел, което може да се използва за формиране на релефно изображение. **Сателитното изображение** се получава от непрекъснато излъчваните милиони радарни сигнали по *линията на видимост на радара (LOS)* (фиг. 57).

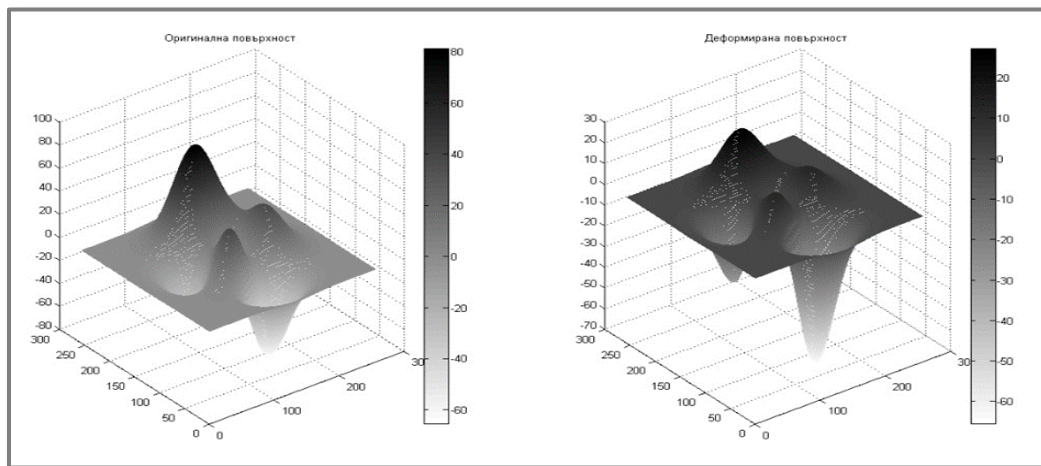


фиг. 57 Линия на видимост на радара (LOS)

Спътниците преминават по определена орбита както от юг на север (*възходяща орбита*), така и от север на юг (*низходяща орбита*), а от особено значение при обработката на данните е и *използвания честотен диапазон (обхват, лента) В* (C band 4-8 GHz; X 8-12 GHz; Ku 12-18 GHz).

❖ методи за обработка и създаване на изображение

Основен метод е *методът на двете преминавания*, наричан още елиминация чрез цифров модел на релефа (DEM), който премахва ефекта на топографията. От двете изображения се получава *интерферограма*, а от наслагането със симулираната от релефа се получава резултантната интерферограма (*“диферентна интерферограма“*) като разликата между тях съдържа само промените в преместването (фиг. 60) [128].



фиг. 60 Резултантна интерферограма

❖ Следене на деформационни процеси. Грешки и точност

Чрез *комбиниране* на поредица от сателитни измервания може да се проследи деформацията на определено място във времето, при условие, че отражението е приблизително еднакво във всяко сателитно изображение. Поради близката до полярна орбита на спътниците, измерванията са *много по-малко чувствителни* към движенията (преместванията) в направление север - юг.

Пряко влияние върху точността на спътниковите радарни измервания оказват както **техническите възможности** на използваната апаратура, така и условията (**средата**), където се провеждат.

Едно от ограниченията е *времевата декорелация* и *декорелацията в пространството* при прекомерното отдалечаване на позициите на двата сателита, наред с *променящата се атмосфера*. Значимо е и *влиянието на кривината на Земята*, както и *качеството на използвания DEM*.

След разгъване на фазата и трансформиране (*геокодиране*) в конвенционална геодезична система, от обработените спътникови измервания може да се изработи карта на движенията на повърхността [93]. Резултатите от съвременната InSAR радарна интерферометрия позволяват *да се заснеме релефа* (земната повърхност) на обширни райони (ширина до 250 km) с точност $\pm 2,8$ cm – използва се за мониторинг не само на деформации, но и при локализиране на разломни пукнатини, ерозия, абразия и др.

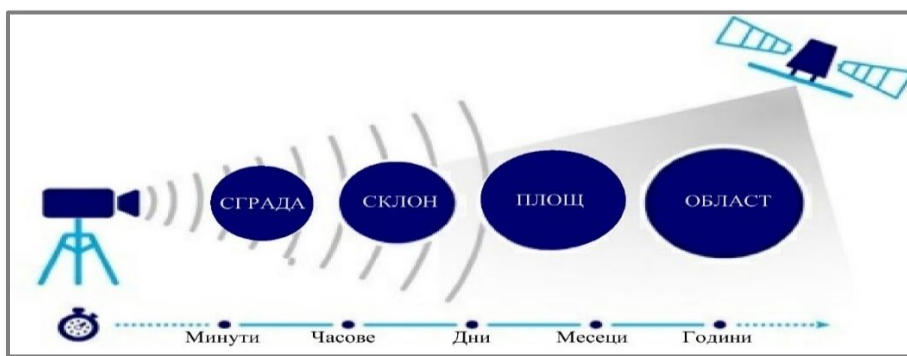
❖ Приложения

Използването на InSAR е свързано с получаването на информация за поведението на големи площи, без да е нужно скъпо оборудване. Технологията дава и възможност за продължителни наблюдения, проследяване на различни геологични феномени и получаване

на много по обем и достатъчно точни данни, за картографиране на пукнатини и следене устойчивостта на големи открити рудници.

Наземна радарна интерферометрия

Радарните инструменти осигуряват пространствено покритие с висока разделителна способност на разстояние до 4 км, регистрирайки дори и най-малките премествания (0,1 до 1 mm) чрез използването основно на два вида радарни системи – истински и синтетични (RAR и SAR). В момента наземната радарна интерферометрия (GBRI) е популярна дистанционна техника за наблюдение на свлачища, мини, мостове, кули, язовири и др. Тя лесно се допълва с космически SAR [81] - малки площи за кратко време комбинирани с дългосрочни наблюдения на големи територии (хиляди km²) (фиг. 64).



фиг. 64 Възможности на радарната интерферометрия

❖ Принцип на действие. Видове радари

Измерването на малки премествания върху земната повърхност се базира на **измерването на фазовата разлика $\Delta\phi$** между двата сигнала - излъчен и отразен. Обикновено се използва модулиран сигнал - честотната лента B на излъчване при 95% от радарите е от 4 до 18 GHz, като в диапазона Ku band (12-18 GHz) попада около 60% от апаратурата.

В практиката са се наложили няколко вида наземни интерферометрични радара (*ротационни, дъгови, с подвижно рамо* и др.), но с най-голяма популярност, при висока надеждност и разделителна способност е **линейният радар** (фиг. 67)

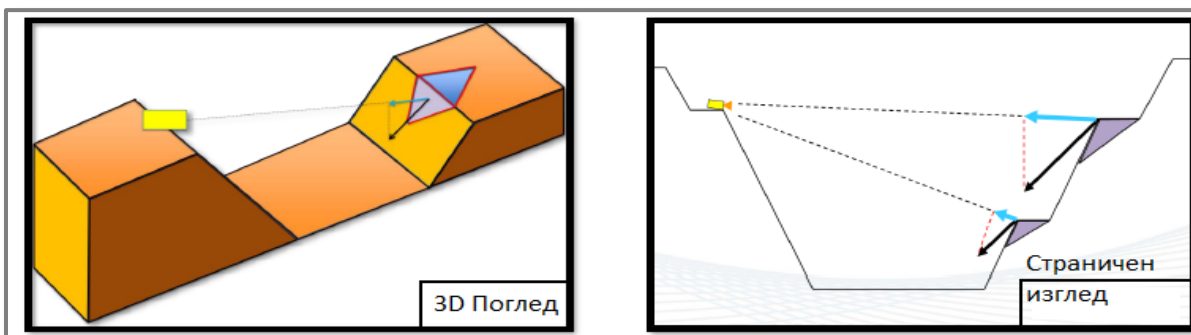


фиг. 67 Линеен радар

❖ Модулация, зрително поле, перспективи

В практиката се използват основно радар с *честотна модулация* (Frequency Modulation - FM), при което разстоянието се определя чрез честотната разлика (Δf) между излъчения и отразен сигнал [130]. При линейните радар с увеличаване на обхвата на зрителното поле се намалява ъгловата разделителна способност.

Интерферометричният радар регистрира само компонентата на преместване по посока на наблюдаваната точка (фиг. 70 - със синьо). Движенията, които са перпендикулярни на радарната линия на видимост ще покажат нулево преместване.



фиг. 70 Премествания регистрирани от радара

Точността, с която се регистрират премествания при радар с честотния диапазон 12-18 GHz (Ku band) е около 0.1 mm, така че със същата точност трябва да се позиционира и механичната движеща се система.

Технически характеристики и възможности на използваните радар

В откритите рудници “Елаците” и “Асарел” едно надеждно решение е използването на **линейните радар** IBIS-FM на италианската фирма IDS GeoRadar (фиг. 73).



фиг. 73 Линейна радарна система IBIS-FM

Радарната система има висока пространствена разделителна способност – пикселът при сканирането отговаря на клетка с размери 0.5x4.4 m на 1 km и 0.5x8.8 m на 2 km. Обхватът на територията е площ до 5 km² на разстояние 2 km, а времето за сканиране - по-

малко от 3 min. Тя е много подходяща за дългосрочен мониторинг с гарантирана достоверност на информацията и възможност за съхранение на огромен масив от данни.

Обработката на измерванията (след корекции от метеорологичната станция) се извършва от специализиран софтуер Guardian.

Основното предназначение на радарните системи е да генерират алармени сигнали (съобщения) с цел ранно предупреждение. При зададени алармени прагове (критични стойности) системата задава *два вида аларми – геотехническа*, за промяна в поведението на откоса и *критична*, при която се евакуират техника и хора.

3.2.2. Геодезическа наблюдателна система

Системата за геодезически мониторинг в откритите рудници включва контролни (мониторингови) репери, станции (постоянно оборудвани с инструмент) откъдето те се наблюдават и контролни (ориентирни) точки. Допълнителен контрол се осъществява с прецизни ГНСС измервания.

Контролните репери са снабдени с отражателни призми, станциите са върху стълбове за наблюдение, с устройства за принудително центриране, а неизменното им положение се следи и чрез прецизни ГНСС измервания при пълна автоматизация.

Роботизирана тотална станция

Използват се електронните инструменти на Trimble, а роботизираната тотална станция **Trimble S9 1" Autolock DR HP Long Range FineLock** е едно много добро решение, съчетаващо секундна ъглова точност с високоточния далекомер Trimble DR HP.

ГНСС измервания – инструментално оборудване

Доказаната и надеждна ГНСС технология се осъществява с многофункционалния и с широки възможности приемник **Trimble NetR9 Ti-3** и антена Trimble Zephyr Geodetic 2. Със своите 440 сателитни канала, осигурява много добра ефективност на сателитното проследяване за различни ГНСС:

- GPS - L1/L2/L2C/L5;
- GLONASS –L1 C/A и некриптиран P код, L2 C/A и некриптиран P;
- Galileo – GLOVE-A и GLOVE-B;
- SBAS – L1 C/A.

Деформационния мониторинг се извършва надеждно, заради високата точност при позициониране - (3 mm + 0.1 ppm) в планово отношение и (3.5 mm + 0.4 ppm) във височинно.

Контролен пункт за управление

Ежедневните непрекъснати наблюдения създават един *огромен по своя обем масив от данни*. Цялата информация, освен че трябва да бъде съхранена, трябва да бъде подходящо обработена и онагледена, с цел анализ и интерпретация на получените резултати. Като част от геодезическата наблюдателна система се явява съвременната софтуерната платформа **Trimble 4D Control** (като допълнение се използват и други начини за обработка).

Trimble 4D Control осигурява информация в реално време за настъпили деформации, а данните от всяко измерване се съхраняват в SQL база данни с лесен достъп. Тя се състои от няколко модула със специфично предназначение:

- Trimble 4D Control Сървър - изчислителен модул, където в реално време пристигат данни от геодезическите инструменти, които се обработват, визуализират и записват в мониторинговата база данни;

- Trimble 4D Control Desktop - за дефиниране, конфигуриране и настройване на различните типове инструменти;

- Trimble 4D Control Уеб - уеб сървър, който служи за визуализация и анализ на данните, генериране на предупредителни съобщения и експорт в различни формати.

Trimble 4D Control *поддържа разнообразни възможности* за различни видове мониторингови проекти в дългосрочен план.

Изводи

1. Нарушеното природно равновесие, в резултат на изземването на минна маса и оформянето на насипища обуславя мониторинга на деформационните процеси в две направления - безопасност на съоръжението като цяло и анализ на факторите с цел прогнозиране и управление на процеса.
2. Активните дистанционните изследвания в обектите за открит добив имат голяма обзорност - за глобални и локални наблюдения - при много добра разделителна способност.
3. Сравнението между различните методи за мониторинг безусловно налага т. нар. система "георобот", като комбинация от роботизирана тотална станция и прецизни ГНСС измервания, допълнени с наземната радарната система за ранно предупреждение.
4. Точността, на определените с ГНСС измервания координати на станциите, от порядъка на 3 - 5 mm, в комбинация с изравнението от геодезическата основа, гарантира тяхната неизменност, а спътниковите измервания се прилагат и са най-бързият, достъпен и точен начин, и при заснемане на стъпалата след провеждане на взривяване.
5. Автоматизираните наблюдения с честота 1 час през цялото денонощие, позволяват регистрирането на хиляди данни с изключение само на моментите с лоша видимост - дъжд, сняг, мъгла, запрашеност. А пространствените координати на контролните репери и техните вектори на преместване са добра основа за статистическа обработка, анализ и прогнози.

4. АНАЛИЗ НА МАРКШАЙДЕРСКИ НАБЛЮДЕНИЯ НА РЕПЕРНА МРЕЖА И МОНИТОРИНГОВА СИСТЕМА В ОТКРИТ РУДНИК ЗА ДОБИВ НА МЕДНА РУДА

При анализа за т. нар. “тестови период” на автоматизираната мониторингова система са използвани данни за периода от ноември 2013 г. до май 2015 г., предоставени от “Асарел - Медет” АД. Това са резултатите от периодични измервания на наблюдавани точки, разположени в целият котлован на рудника:

- координати на наблюдаваните точки (призми) получени след обработка на измерванията с тотална станция;
- координати на наблюдаваните точки (репери) получени след обработка на измерванията с ГНСС;
- първични данни от измерванията с тотална станция.

По-голямата част от точките са извън зоната на предпазният целик, в участъка където са разположени “полустационарен трошачен комплекс” (ПТК) и Циклично-поточна технологична линия (ЦПТЗ), като са обработени и анализирани повече от половин милион измервания с общ обем над 690 МВ.

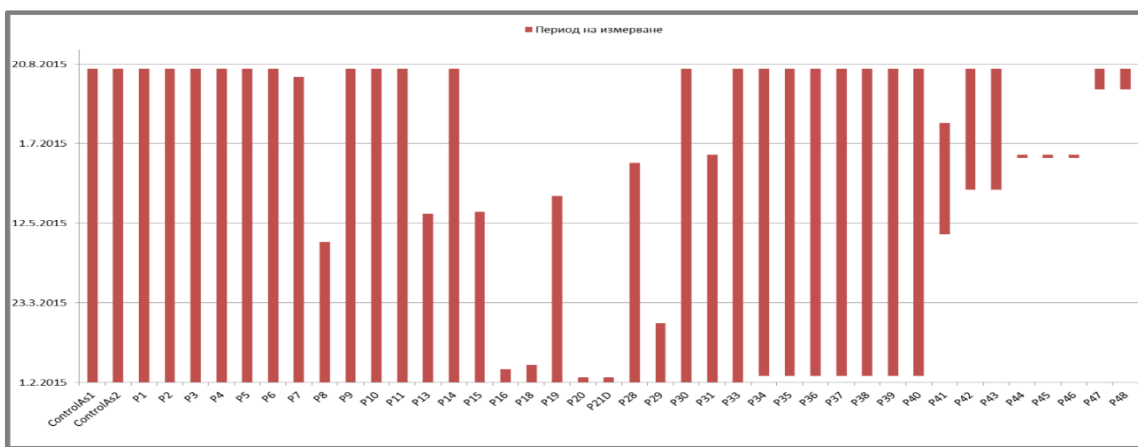
Изследвани са пространствено-времеви зависимости между компонентите на деформационното поле с използване на статистически методи и интерпретация на получените данни от позициите на геодинамичния подход.

4.1. АНАЛИЗ НА ПЪРВИЧНИ ДАННИ ОТ ИЗМЕРВАНИЯ С ТОТАЛНА СТАНЦИЯ TRIMBLE S8

Предоставените данни от измерванията са извършени с тотална станция модел Trimble S8, а точността при полярното определяне положението на точките зависи от различни фактори, които могат да се отнесат към следните три групи:

- инструментални грешки;
- грешки при измерванията;
- грешки от метеорологичните условия.

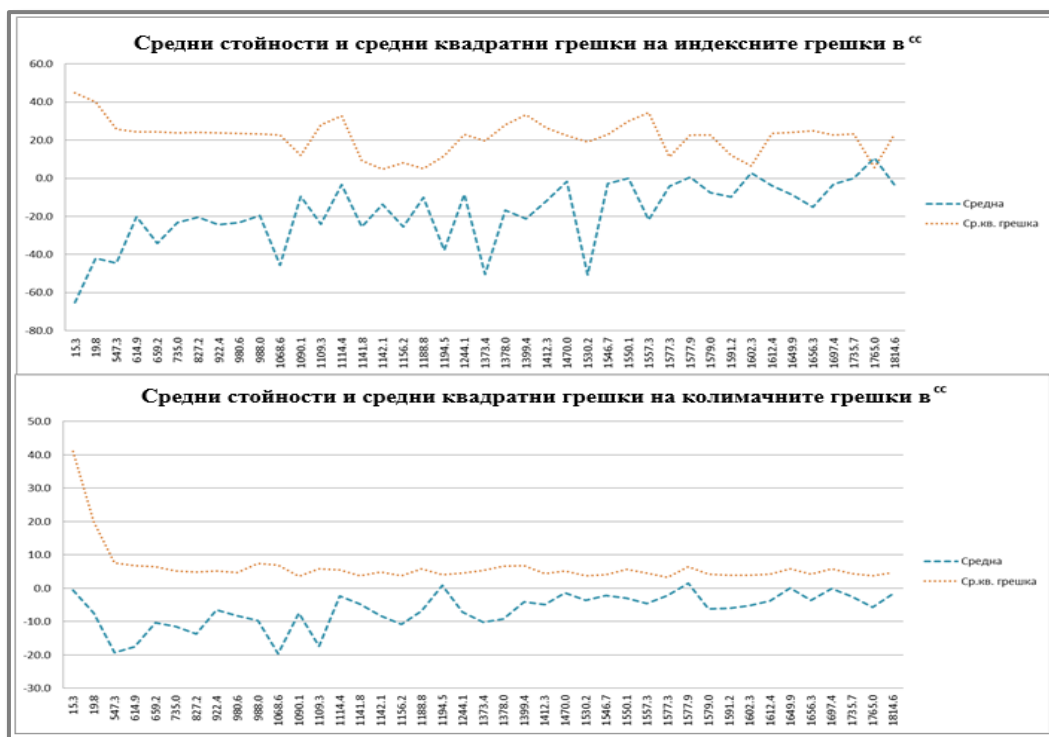
На фигура 84 схематично са представени периодите от време на измерванията за всяка точка.



фиг. 84 Период на измерванията

Целта на анализа е установяване фактичестката точност на измерванията при използване на конкретния модел инструмент за конкретните условия на рудника. При анализа се отчита, че някои от разликите е възможно да се дължат на премествания на наблюдаваните точки, поради което основно се анализират **параметри, независещи от положението на точките** при различните цикли измервания.

Показатели за точността на ъгловите измервания, които не зависят от преместванията на наблюдаваните точки, са индексната и колимачната грешки (фиг. 85).



фиг. 85 Индексна и колимачна грешка - средни стойности и оценки

Графиките не показват съществена зависимост на колимачната и индексните грешки от разстоянието. Аналитичната оценка за това са корелационните коефициенти, които за средната стойност са 0.48 и 0.64 за колимачните грешки и съответно 0.68 и 0.38 за индексните грешки. Правят впечатление значително по-големите стойности (около 4 пъти) на индексните грешки от колимачните. Много вероятна причина за това е значително по-голямото влияние на вертикалната рефракция.

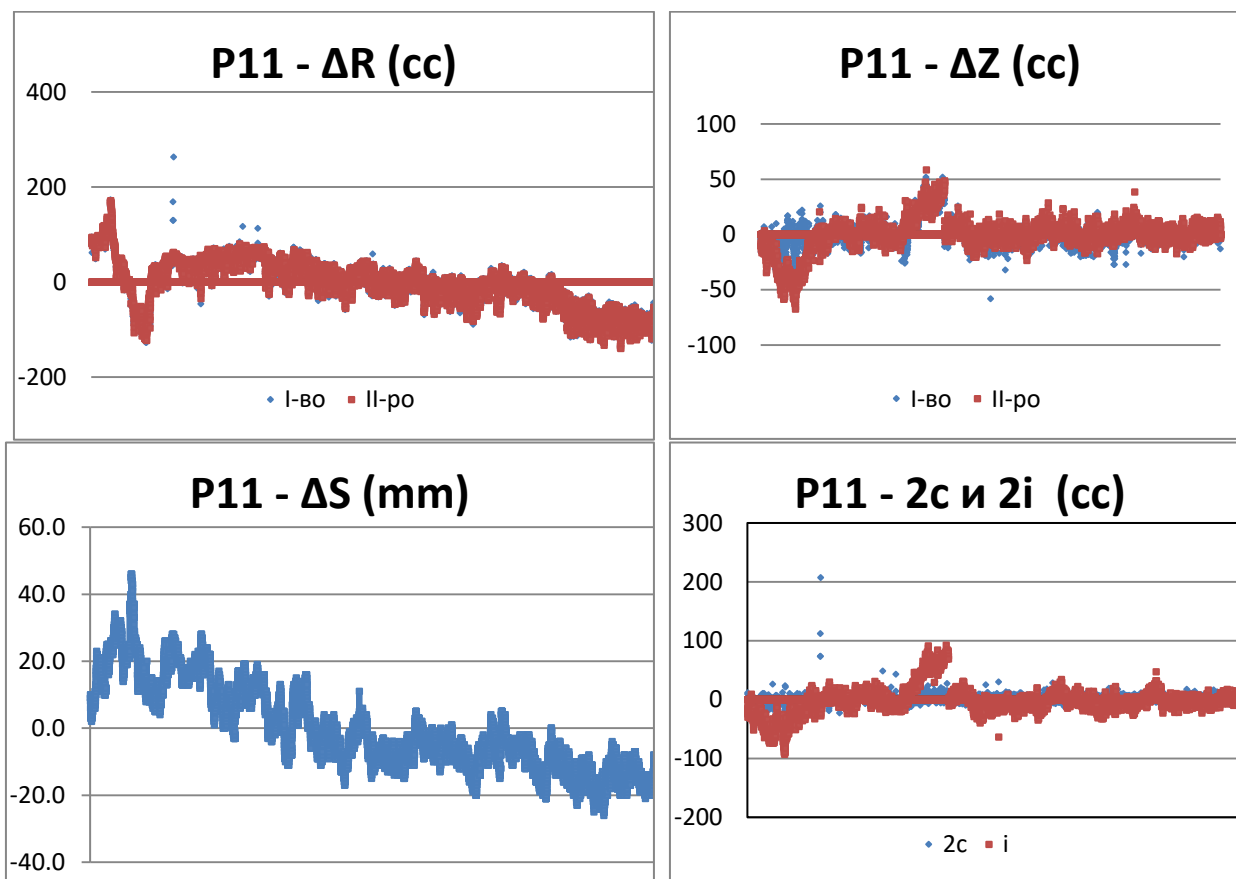
Анализът на данните от измерените дължини в един гирус, както и по групи с измервания от няколко последователни дни показва, че стойностите на СКГ в групите са близки до тези от паспортните на инструмента. Това се потвърждава и от графиката на фигура 89, от която се вижда, че при по-малка продължителност на измерванията грешката е близка до паспортната. И тук възможна причина за по-големите средни квадратни грешки са преместванията на наблюдаваните точки.

При анализа за оценка на комбинираното влияние на разстоянията и зенитните ъгли, за средни разстояния и зенитен ъгъл към наблюдаваните точки в рудник "Асарел" точност

на измерените разстояния 1-2 m не влияе върху определянето на котите повече от точността на определянето на зенитните ъгли. Обобщения анализ за всяка точка поотделно е като този за т. 11, фиг. 91.



фиг. 89 СКГ на дължините според продължителността на измерванията



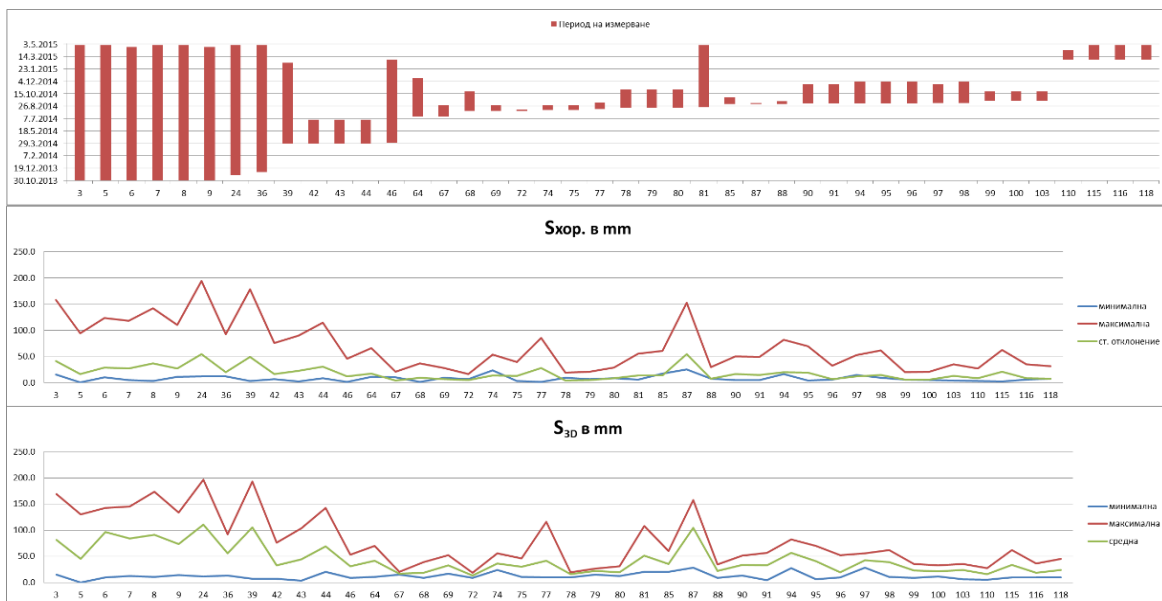
фиг. 91 Отклонения на посоките, зенитните ъгли и дължини от средните стойности

За данните от измерванията през избрания период **ПО-ВАЖНИ ИЗВОДИ**, които могат да се направят са:

1. Индексната и колимачната грешки не зависят съществено от дължините на визурите, при големите разстояния (средно 1240 m).
2. Основно влияние върху точността на определянето на наблюдаваните точки в план оказва точността на измерените посоки, а точността на определяне на котите им зависи основно от точността на определяне на зенитните ъгли, без практически да се влияе от наклонените разстояния.
3. Резултатите от измервания с по-големи индексни и колимачни грешки не следва да участват в обработката - най-вероятна причина за тях е промяна в метеорологичните условия между измерванията при I-во и II-ро положение.
4. Точността на измерванията на наклонените разстояния е близка до тази в техническата спецификация на инструмента (показана с червено), а значително по-точното се установяват премествания на наблюдаваните точки в направление на визурите.
5. Поставянето на мониторинговите станции в направление на очакваните деформации (една от координатните оси на условната координатна система), ще повиши точността на определянето на преместванията на точките.
6. Резултатите от мониторинговите измервания следва да се използват след критична оценка на първичните данни от измерванията.

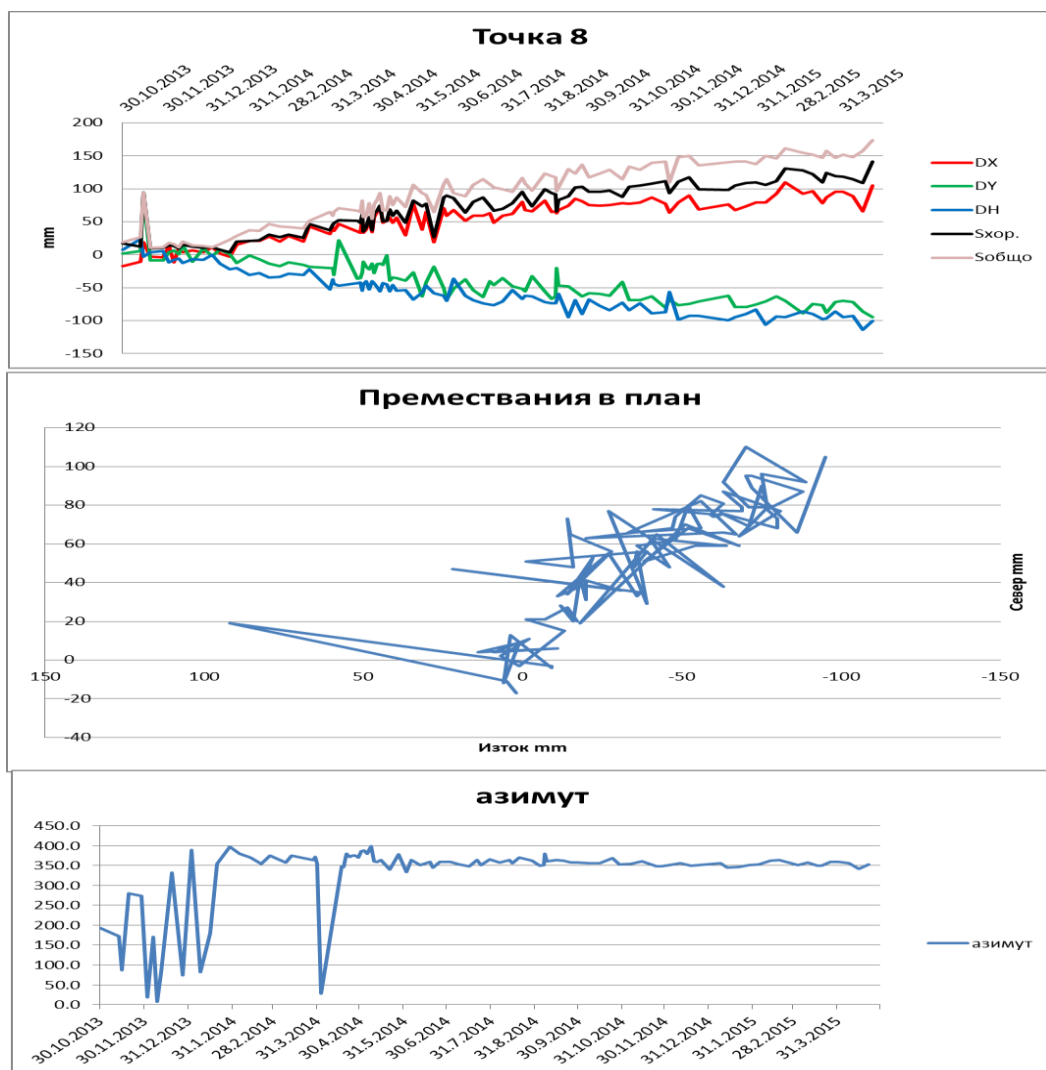
4.2. АНАЛИЗ НА ДАННИ ОТ ПЕРИОДИЧНИ ИЗМЕРВАНИЯ НА НАБЛЮДАВАНИ ТОЧКИ (РЕПЕРИ) ПОЛУЧЕНИ ЧРЕЗ ИЗПОЛЗВАНЕ НА ГНСС

Определяне на преместванията на част от наблюдаваните точки, чрез използване на ГНСС, е на база измервания, извършени с приемник Trimble R6 в режим RTK за 42 от наблюдаваните точки. Графично интервалите от време, за които са извършвани измервания за съответните точки са представени на фиг. 93.



фиг. 93 Двумерен и тримерен вектор и времетраене на измерванията

За всяка от точките е извършена обработка и са изчертани по три графики. Първата илюстрира преместването на наблюдаваната точка спрямо първото измерване по направления на координатните оси X, Y и H, това са съответно ΔX , ΔY и ΔH , както и преместването в план $S_{\text{хор.}}$ и в пространството $S_{\text{общо}}$ (или 3D) - по абсцисата е отразено времето на измерване, а по ординатата – съответното преместване в mm (фиг. 94).

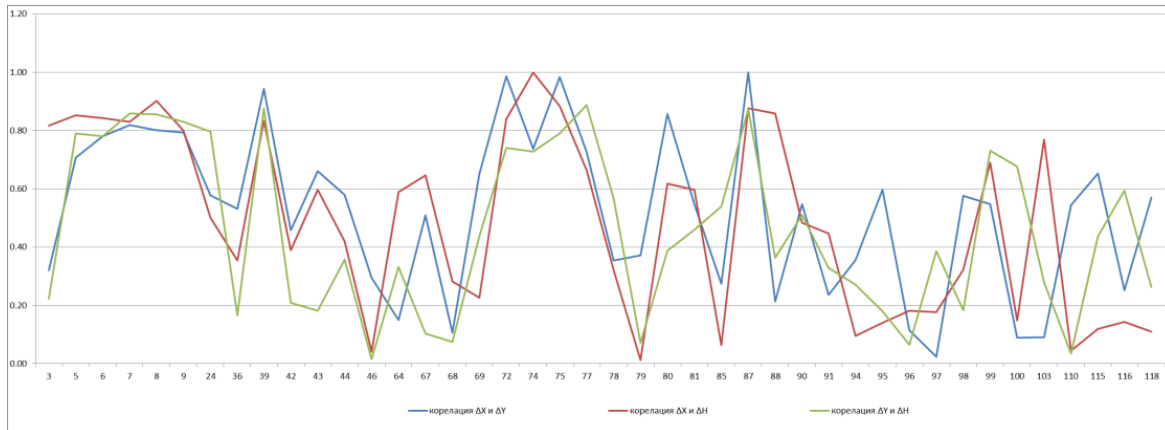


фиг. 94 Компоненти на преместването

В повечето наблюдавани точки съществува зависимост между стойностите на натрупаните деформации и времето през което са определени преместванията, което най-вероятно се дължи на плавно деформиране на масива. За наблюдаваните за продължителен срок точки (над 1 година) се установяват приблизително еднакви стойности на скоростите на преместванията около 9 mm/месец.

За илюстриране на зависимостите между преместванията по трите координатни оси са изготвените графики (фиг. 96) на корелационните коефициенти на връзките между

преместванията в северна и източна посоки, в северна и по височина, и в източна и по височина.



фиг. 96 Корелационни коефициенти между компонентите на преместването

Прилагането на ГНСС технологията при изследване на деформации и постигането на точност под 1 cm или даже 3 до 5 mm в положението на точките се постига при определени условия на измерванията, което за откритите рудници не винаги е възможно.

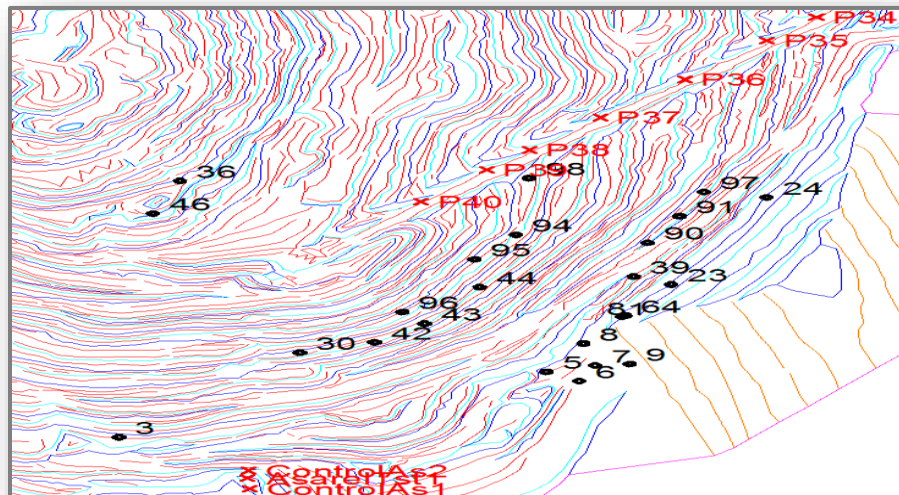
Изводи:

1. Точността на измерванията не зависи от метеорологичните условия и се определя основно от метода, който се прилага, начина на центриране на приемника над наблюдаваната точка, конфигурацията (разположението) и броя на спътниците.
2. Непрекъснат мониторинг чрез ГНСС в рудник „Асарел“ е неприложим, поради големият брой наблюдавани точки (завишени разходи) и трудности при самото придвижване.
3. Точността на определяне на положението на наблюдаваните точки чрез ГНСС е по-голяма от точността на определянето на положението им с моторизирана тотална станция Trimble S8.
4. За повечето точки се наблюдава движение в северозападна или югозападна посока, стойността на което зависи до голяма степен от продължителността на измерванията.

4.3. АНАЛИЗ НА ПЪРВИЧНИ ДАННИ ОТ ИЗМЕРВАНИЯ С ТОТАЛНА СТАНЦИЯ TRIMBLE S8 В ЮГОИЗТОЧНАТА ЧАСТ НА РУДНИК „АСАРЕЛ“

За наблюдаване на деформационните процеси в югоизточната част на рудник „Асарел“, в района на ПТК и ЦПТ 3, са поставени 7 точки (призми) (фиг. 99), а резултатите от измерванията са за период от около шест месеца (февруари - август 2015 г.).

Наблюдаваните точки са при значително по-стръмни визури и по-къси разстояния, при което категорично е установена рязка промяна в стойностите на зенитните ъгли и индексните грешки на 25-ти април заради автоматичната промяна в настройките на тоталната станция, като измерванията до този момент са елиминирани.



фиг. 99 Точки в района на ПТК и ЦПТ 3 (с червено)

По-съществени изводи:

1. При анализ за сравнително кратък период от време - няколко месеца, при значително по-къси разстояния от станцията (останалите точки са средно 1.8 пъти по-далече) и при по-стръмни визури (по-големи стойности на зенитните ъгли), индексната и колимачната грешки не зависят съществено от дължините на визурите при средно разстояние между станцията и наблюдаваните точки 755 m.

2. Индексните грешки са около 3 пъти по-големи от колимачните за периода, като някои техни стойности са недопустими съгласно действащите нормативи, а най-вероятна причина за това е значително по-голямото влияние на вертикалната рефракция.

4.4. СТАТИСТИЧЕСКА ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ НА КООРДИНАТИТЕ НА НАБЛЮДАВАНИТЕ ТОЧКИ (ПРИЗМИ) ПОЛУЧЕНИ СЛЕД ОБРАБОТКА НА ПЕРИОДИЧНИТЕ ИЗМЕРВАНИЯ С ТОТАЛНА СТАНЦИЯ И ГНСС

Изследването на пространствено-времените зависимости между компонентите на деформационното поле е осъществено с използване на статистически методи и интерпретация на получените данни.

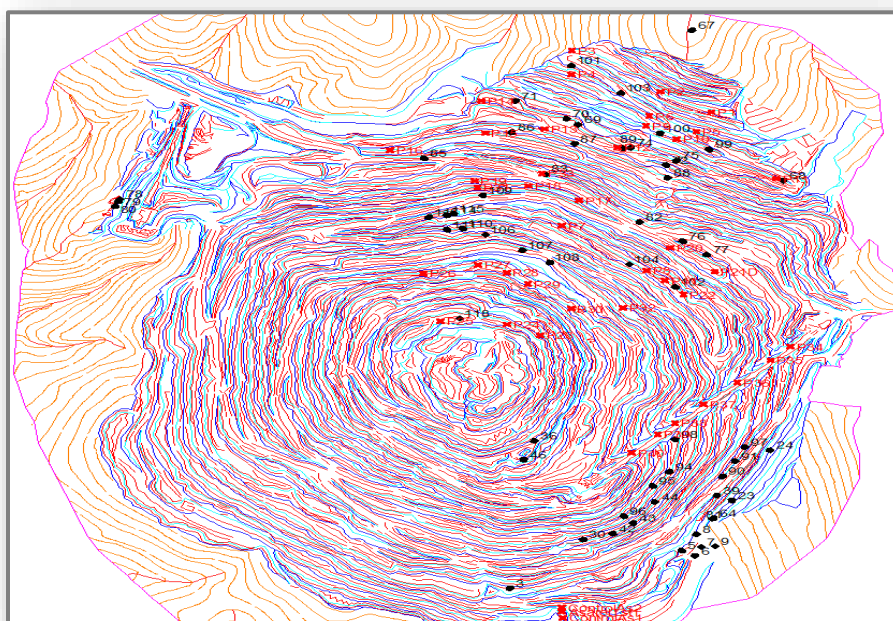
Статистическата обработка включва:

- анализ на информативността на компонентите на деформационното поле;
- анализ на изменението на взаимните разстояния между “призмите“ в план във времето;
- класифициране на “призмите“ по скорости на преместванията;
- оценка на дневните и сезонните вариации на измерванията;
- анализ на корелационните свойства на остатъчните полета;
- анализ на двумерни разпределения и класифициране на “призмите“.

Софтуерната среда за обработка и числен анализ на многобройните данни е MATLAB (MATrix LABoratory), а визуализацията, след изглаждане и филтриране, с инструментите на Surfer.

Входните данни включват преизчислените стойности на координатите и надморските височина. Използвани са резултатите от измерванията за периода от 09.2014 до 05.2015 г. като разположението на точките в план е показано на фиг. 101 - "призмите" са в червен цвят, а реперите – в черен. Измерванията са извършвани по нерегулярна схема, като в голяма част включват повторни регистрации през различни часове в денонощието. Общо са направени 20507 записа на координати на репери, разположени на различни хоризонти.

Върху точността на измерванията оказват въздействие фактори, влияещи върху линейността на оптичския канал като изменение на температурата и налягането, прозрачността на въздуха, наличието на дисперсни частици и други във времето, както и разпределението на тези фактори в пространството между измервателната станция и съответните репери. При изследването на деформационното поле се предполага, че данните са меродавни, а измерените деформации са обусловени от обективни фактори.



фиг. 101 Схема на разположението на "призмите (червено) и реперите (черно)

Измереният сигнал (координата по всяка от осите) се разглежда като сума от премествания на масива под влиянието на различни фактори и сума от грешки на измерването, предизвикани от процеси с различна физическа природа

$$F = \sum_{i=1}^n f_i + \sum_{j=1}^m n_j , \quad (4.4)$$

където от 1 до n е сумарното влияние на отделните фактори, а от 1 до m – на грешките при измерването.

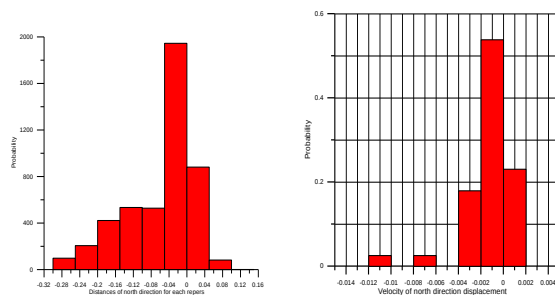
Предположенията са, че *преместванията на масива* се дължат на следните фактори:

- реакция на масива към изменението на първичното му напрегнато-деформирано състояние в резултат на минните работи;
- диференцирани тектонски движения;
- циклични геодинамични процеси.

Грешките при определяне на преместванията биха могли да бъдат предизвикани от:

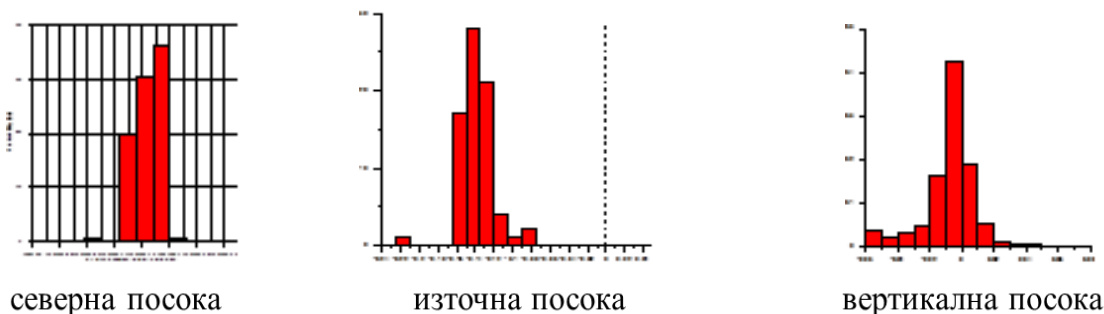
- движения на “призмите“ под влияние на екзогенни фактори (замръзване, оводняване, термично разширяване и други);
- деформиране на траекторията на оптичския лъч под влияние на неравномерно разпределени температура, влажност, налягане, дисперсионност на въздуха (запрашеност, мъгла, сняг) и т.н.

Обобщеното представяне на наличните данни е чрез плътностите на разпределенията на функцията на вероятностите на преместванията и средните скорости, където се наблюдава определена асиметрия и добре изразени максимуми (фиг. 102)



фиг. 102 Плътности на вероятностите в северна посока

За по-детайлно изследване на сигнала са изчертани хистограми показващи разпределението на компонентите на деформационното поле по отделни репери (фиг.103). Многомодалните разпределения се апроксимират като набор от нормално разпределени класове. Класифицирането на всеки от класовете се извършва чрез сравняването на разстоянията между техните моди, а също така по отношение на нулевата стойност.



фиг. 103 Хистограми на преместванията за т. Р1

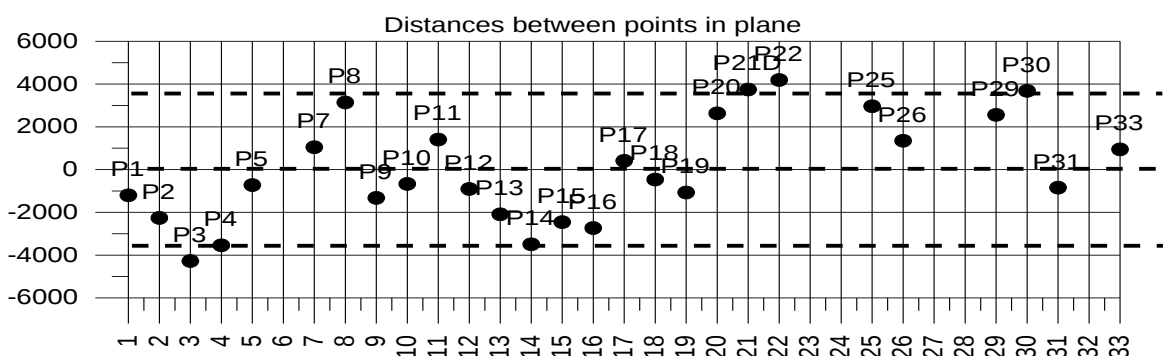
При наличието на бимодално разпределение се предполага изменение на въздействието на различните фактори, водещи до изменение на компонентите на

преместване на репера във времето и е нужна допълнителна информация за динамиката и обемите на добивните работи, дренването на рудничните води и тектонската структура.

За изследване на разликовия ефект при групови премествания основното предположение е, че всички точки се преместват в пространството, но част от тях се движат с минимална скорост по различните направления, други в група с една и съща посока (вектор), а при трети векторът на преместването е съществено различен. Съответно относителните разстояния между точките в групата във времето се изменят незначително, докато разстоянията между точките не влизащи в групата търпят значителни изменения.

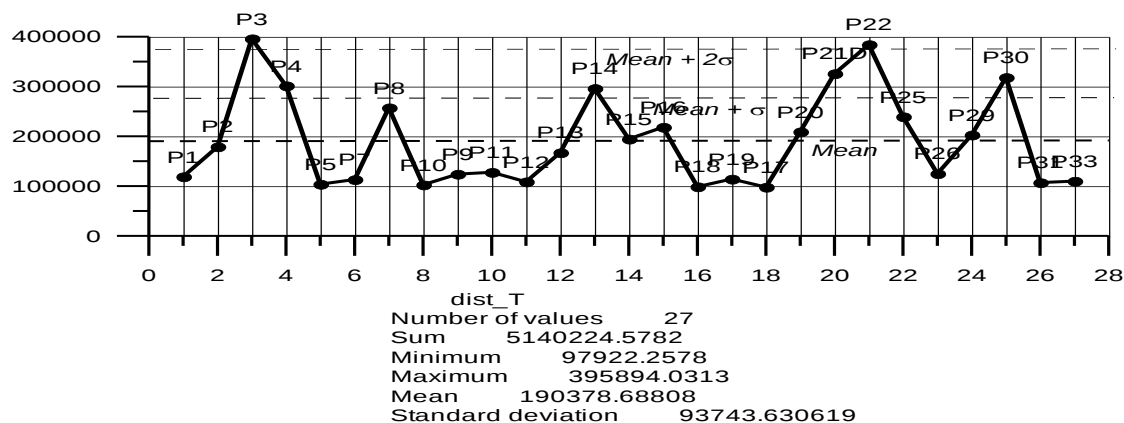
Ограничението на подхода е в това, че се налага да се сравняват преместванията на точките за един и същи период. Пълно съответствие на времената на измерване се наблюдава за 27 репера за интервала 26.09.2014 – 14.10.2014 или 18 денонощия.

Разпределението на сумите за различните репери графично е показано на фигура 105. Точките разпределени в интервала $\bar{x} \pm 2\sigma$ се определят като група, характеризираща се с еднакви показатели, а извън тези предели точките се характеризират с “аномално” поведение.



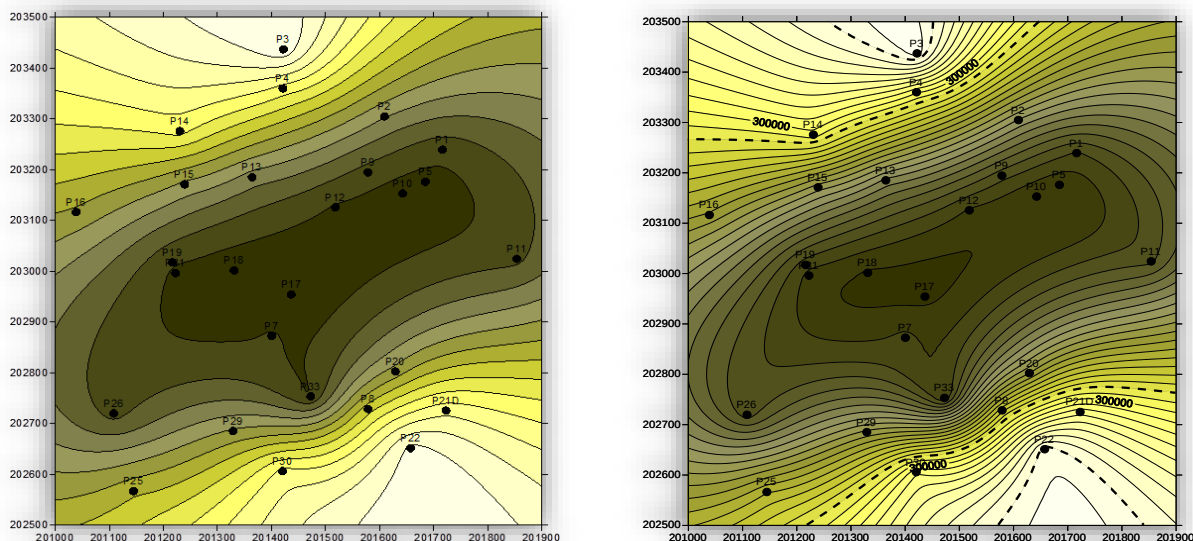
фиг. 105 Сума на разликите между измерените планови вектори на “призмите”

Аналогично е разпределението на сумата от квадратите на тоталния вектор по точките на измерване (фиг. 106).



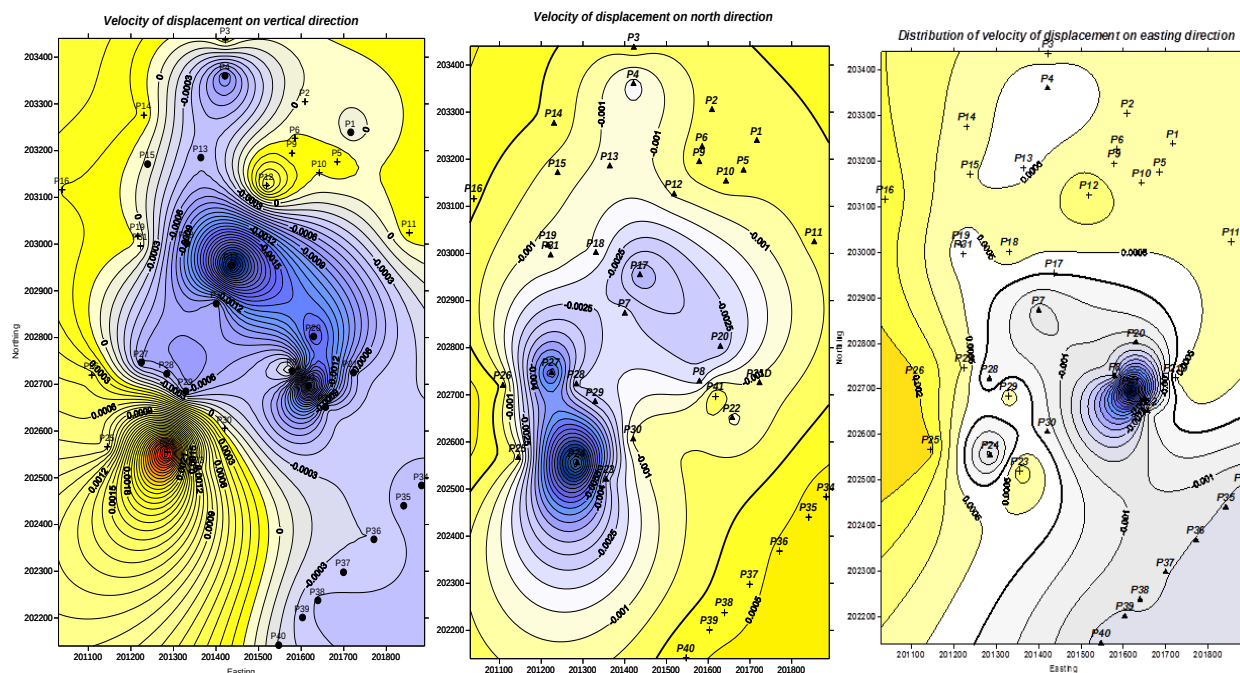
фиг.106 Разпределение на сумите от квадратите на разликите на тоталните вектори

Площното разпределение на разликовия ефект за равнинния вектор $\mathbf{P}$ и за тоталния вектор $\mathbf{T}$ (отговарят съответно на фиг. 105 и фиг. 106) са показани на фиг. 108.



фиг. 108 Площно разпределение

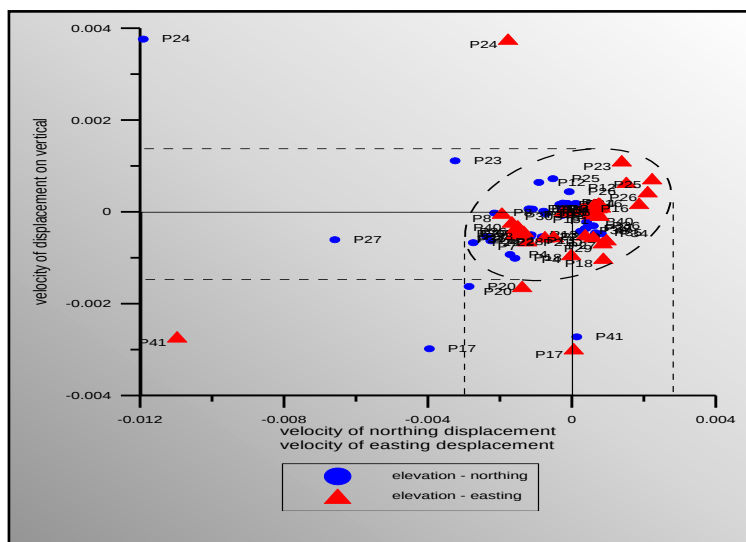
Увеличаване на броя на анализирани репери може да се направи, ако се сравняват не самите премествания, а скоростите на преместване, при условие, че деформационният процес се разглежда като **ергодичен**, т.е. независещ от времето (фиг. 110). Такова предположение можем да се приеме, ако се предположи, че деформациите се регулират само от обема на изетото пространство, създаващо допълнителни гравитационни сили.



фиг. 110 Средни скорости на преместване съответно по височина, на север и на изток

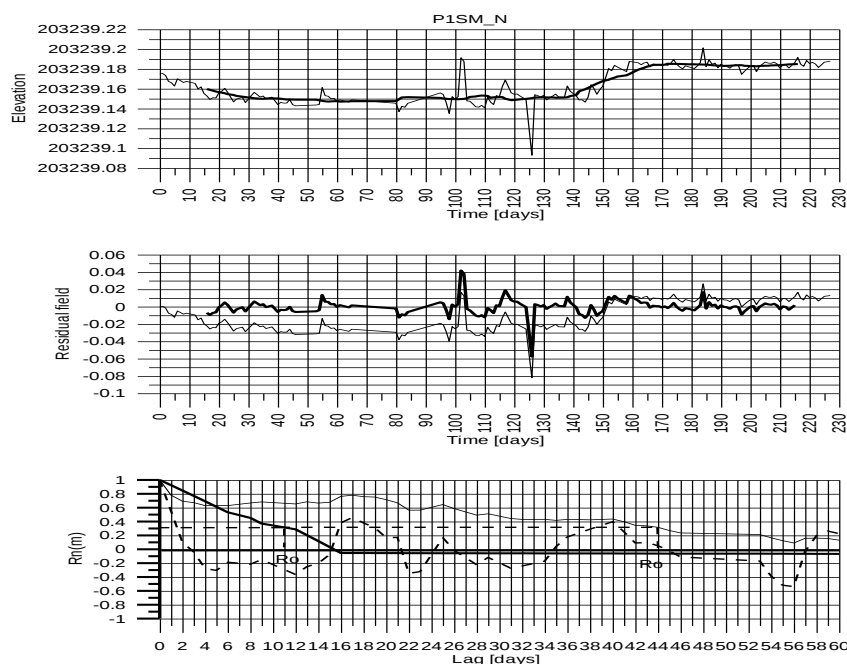
Отбелязват се две зони на аномални деформации. В горната част на борда се наблюдават слягания, а на югозапад се регистрират издвания с амплитуди и на двата типа движения надвишаващи 25 mm – типично начало за развитието на свлачищен процес.

По-голяма информативност се постига чрез представяне на съвместни разпределения на различните компоненти (фиг. 113). На една и съща графика са изобразени зависимостите между скоростта на преместване по вертикала, съответно от скоростта на преместванията в северна и източна посока.



фиг. 113 Съвместно разпределение на скоростите на преместване

Резултатите от изчисляването на остатъчните полета по всяко от направленията на преместване са получени за всяка от “призмите” по трите направления (фиг. 114)

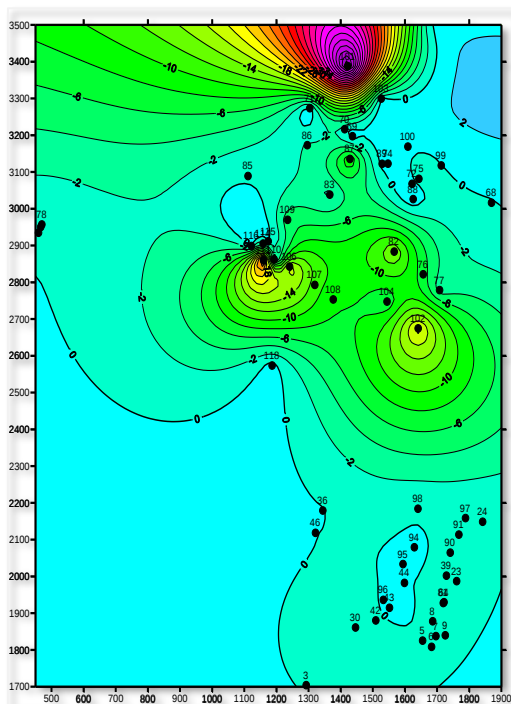


фиг. 114 Ср. стойности, остатъчни полета и АКФ на преместванията по височина за т. P1

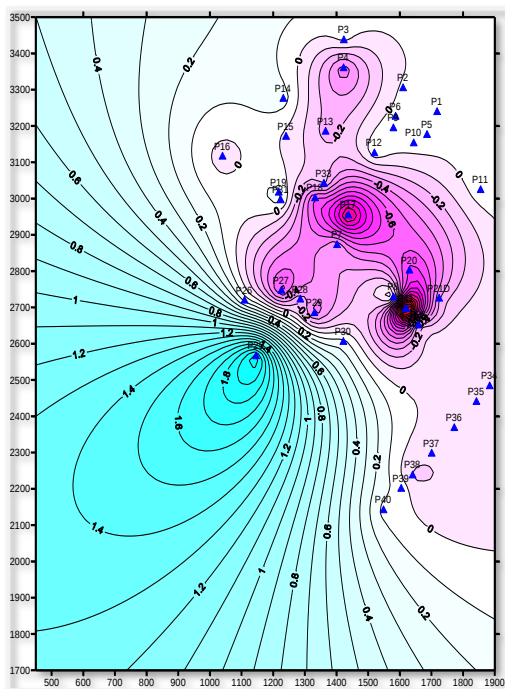
Радиусът на корелация се определя от разстоянието по абсцисата, съответстващо на ниво на значимост (в случая 0.3) от графиката на нормираната АКФ. В дадения случай използването на корелационния анализ отчасти е под въпрос, тъй като наблюденията са квазирегулярни, но ако се приеме обобщен интервал 1-2 дни може да се определя радиуса на корелация. Вижда се, че АКФ на измерения сигнал има радиус на корелация по всички компоненти с дължина не по-малка от 45 дни, което свидетелства за наличието на последователно цикличен процес, често характерен за минно-добивната дейност.

От съвместния анализ на данните получени с тоталната станция и ГНСС измервания личи, че в много от близко разположените точки, направленията на преместванията са различни. Това обезсмисля в голяма степен обработката и сравняването на данните за движенията в план. Тъй като процесите в масива са ергодични, данните се сравняват само по средните скорости на вертикалните премествания, изчислени за целия период на измерване на всяка от точките.

За получаване на полето с изолинии за скоростите на вертикалните премествания се преизчисляват стойностите във възлите на равномерна мрежа по *метода Kriging*, чрез който се минимизира дисперсията на грешките от измерванията, което води и до намаляване на средната квадратна грешка (фиг. 116).



точки, определени с ГНСС

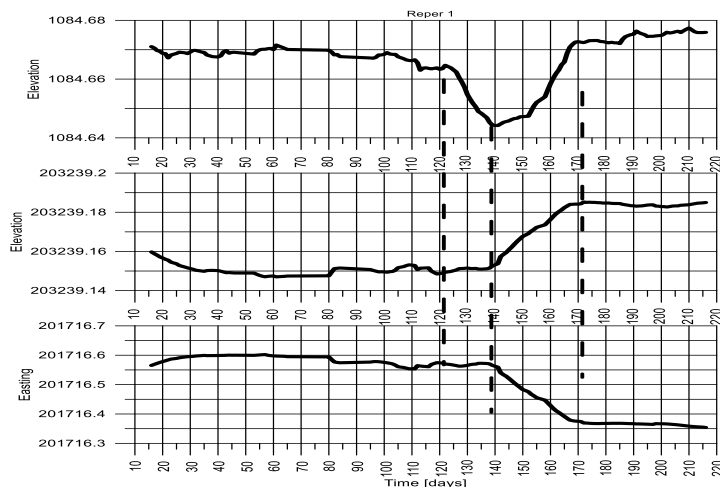


точки, определени с ТС

фиг. 116 Вертикални премествания - средни скорости

В резултат на извършената обработка могат да се направят някои основни заключения и предположения, свързани със стабилността. С относителна стабилност се характеризира районът около репер P1. С най-големи разлики в измененията на разстоянията между точките във времето се характеризират “призмите” P3, P4, P14, P21D, R22, R30. С аномални скорости на преместване са точките P7, P23, P24, P27 и P41. Има основание да се предполага възможността от загуба на устойчивост на борда.

В района на репери P17, P20, P41 се наблюдават отрицателни вертикални движения и ротация в план. Това може да съответства на зона на опънови напрежения в короната на свлачищен масив. В района на репери P23, P24 се наблюдават положителни вертикални движения, които биха могли да бъдат обяснени с подуване във фронтната част на свлачищен блок. Следва да се обърне по-особено внимание върху една характерна особеност на деформационното поле - аномалното му поведение в интервала от 125-я до 155-я ден спрямо началото на измерванията (26.09.2014г) (фиг.119).



фиг. 119 Аномални променливи вертикални движения и деформации в план

Аномалията във вертикалната компонента е практически идентична по всички репери, като амплитудите се различават незначително в пространството. Същата тенденция се наблюдава и за преместванията в план – в северно и източно направление (по X и Y), като деформациите по различните компоненти са абсолютно корелирани по време. В редица случаи може да се забележи и изменение на градиента на сигнала преди и след аномалния период. Особено характерно е скокообразното изменение на преместванията в северно и източно направление. Това изменение започва при достигане на минимума на вертикалните движения и завършва при връщане на първоначалното му ниво. Такива движения, характерни за много открити рудници, са в основата на възникването на активните разломи, водещи до постоянни деформационни зони.

4.5. СЪСТОЯНИЕ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО НА ДЕФОРМАЦИИТЕ В РУДНИК “АСАРЕЛ”

За началния (“тестови”) период при реализацията на системата за автоматизиран мониторинг са характерни различни подходи и средства за следене на деформационни процеси. Измерванията с честота през 6 часа с тоталната станция, увеличава интервала на подаване на данни от системата и съответно времето за реакция при наличието на деформационни процеси. Този интервал от време между циклите е удачен от технологична гледна точка, но не и спрямо изискванията на [15], според които *“измерванията се извършват само в най-благоприятно време”*, което не благоприятства премахването на основния ограничаващ фактор, оказващ влияние върху точността на измерванията в условията на рудник “Асарел” – вертикалната рефракция.

Използването на многократни ГНСС измервания е свързано със значителни разходи на труд и време и е приложимо за непрекъснат мониторинг само при постоянно разположени приемници на наблюдаваните точки.

Изискванията за минимални стойности на наблюдаваните премествания като ограничаващ фактор, според конструкцията на съоръженията, не са в наличност и при анализите са използвани тези, от производителя на ГЛТ и отбелязани като „Толеранси при подравняване на конвейерната конструкция“.

За оценка на точността по формула (2.3)

$$m_{\Delta Q} \leq \frac{\Delta Q_{min}}{2.8} , \quad (2.3)$$

съгласно толерансите, техническото оборудване осигурява точност $m_{\Delta H} \leq 5.4 \text{ mm}$ и $m_{\Delta S} \leq 7.1 \text{ mm}$, особено при прилагане на комбинирани методи при измерванията.

По-важни изводи и препоръки:

1. При изследването на деформациите е препоръчително да се прилагат комбинирано тригонометрични и ГНСС методи. Интервалът на ГНСС измерванията следва да е съобразен с установените скорости на премествания на наблюдаваните точки. При увеличаване на скоростите и установяване на признаци за деформационни процеси при мониторинга с тоталните станции, необходимо е извършване на допълнителни ГНСС измервания за контрол и уточняване на параметрите на преместванията.

2. С цел намаляване на влиянието на вертикалната рефракция върху измерванията, честотата от измервания през един час значително подобрява крайните резултати заради значимия вече брой измервания в тъмната част от денонощието при минимална рефракция.

3. Анализът и тълкуването на резултатите от маркшайдерските измервания и деформациите трябва да се извършват от тези, които ги провеждат или от специално определен за тази цел екип.

4. Интерпретацията на резултатите от измерванията да се извършва съвместно от маркшайдерската служба и от специалисти в областта на геологията, технологията на добива, хидрогеологията, земната механика, конструктори и др.

5. Периодично, на всеки шест месеца да се извършва съвместен анализ на измерванията от прилаганите методи, за определяне на тяхната надеждност и при необходимост да се изготвят препоръки и предприемат действия за повишаване на точността им, включително и чрез прилагането на други методи, например трилатерация.

6. За изследването на деформациите в рудник “Асарел” и съоръженията към него е нужно методическо и техническо обвързване на измерванията, както и на анализа и интерпретацията на резултатите чрез изработена обща стратегия при изследването на деформациите на минните изработки и производствените съоръжения.

7. Методиката от експерименталното изследване може да се използва и при бъдещи анализи.

5. РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗ ОТ ПРАКТИЧЕСКАТА РЕАЛИЗАЦИЯ НА СИСТЕМАТА ЗА АВТОМАТИЗИРАН МОНИТОРИНГ

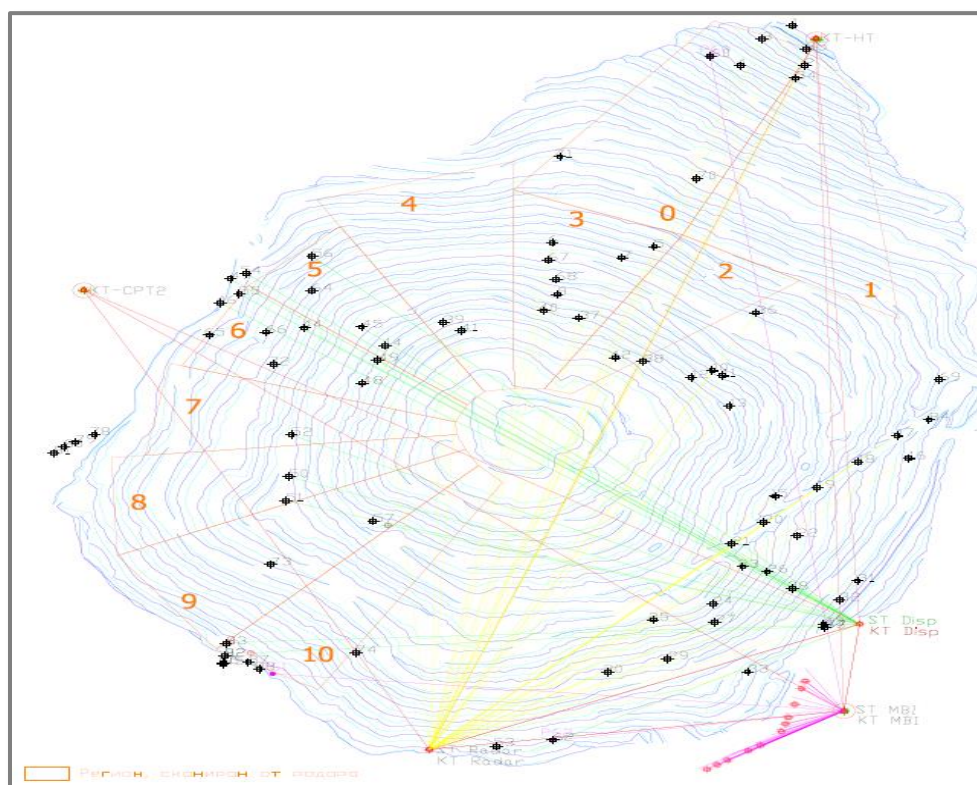
Планът за мониторинг и управление на откосите на рудник “Асарел - Медет” е изготвен съгласно предварително задание и определени допускания и специфична налична информация. Проучването за проектиране на рудника е на база геотехнически данни и отчитане на локалните условия (якост на скалите, разположението и ориентацията на контактните зони, зони на срязване, неблагоприятното въздействие на подземните води и др.), които могат да доведат до нарушаване стабилитета на откосите и необходимост от управлението му по време на добивните работи.

Програмата за мониторинг се състои от няколко системи за мониторинг - на стабилитета на откосите на рудника, на взриво-сеизмичните вибрации, на налягането в порите и на слягането при дрениране на подземните води, като водещо значение има устойчивостта на откосите.

5.1. ИДЕНТИФИЦИРАНЕ НА ВЪЗМОЖНИ ЗОНИ НА НЕСТАБИЛНОСТ

Особено важна е необходимостта от достатъчно прецизно и оптималното предварително разпределение на геодезическите точки и пиезометрите, за да могат да бъдат “покрити” всички зони с очевидна нестабилност.

Актуалното разположение на репери, наблюденията за които са обект на обработка и анализ, както и на тоталните станции е показано на фиг. 121.

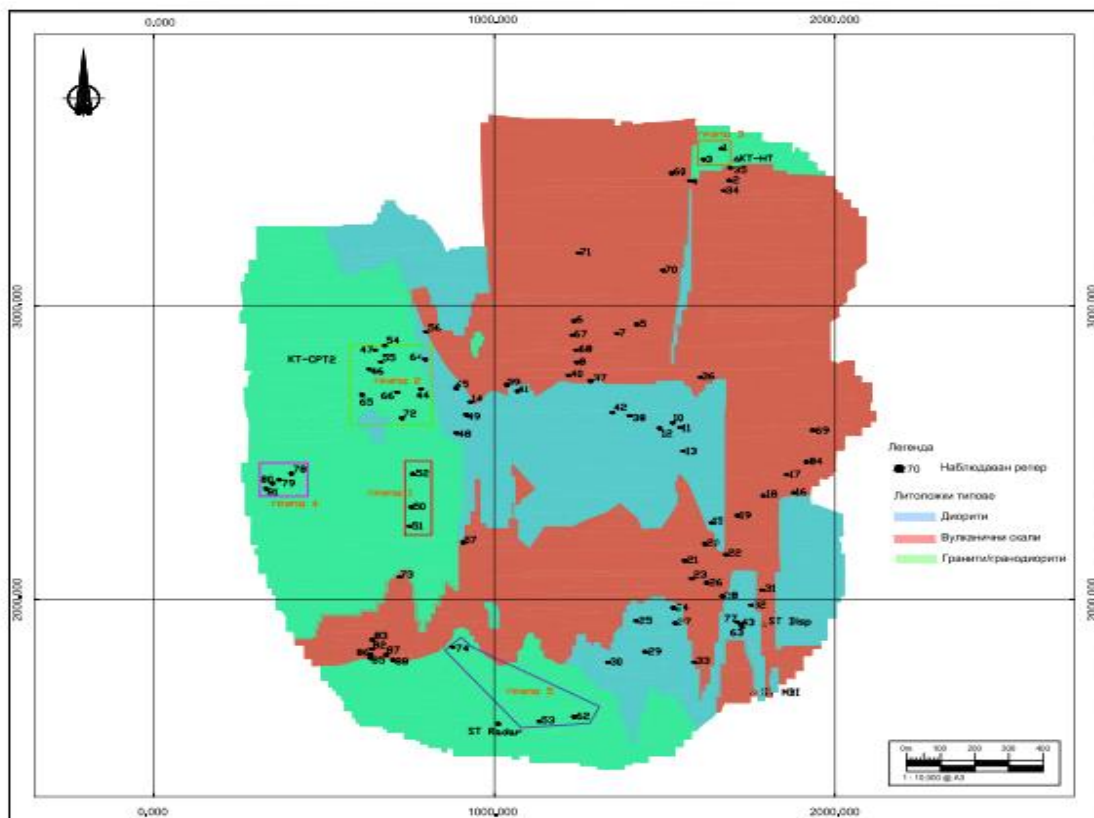


фиг. 121 Рудник “Асарел - Медет” - актуално разположение на реперите и ТС

Измерването на повърхностни премествания може да бъде осъществено с най-елементарни средства – *картиране* на пукнатини на напрежение или чрез *екстензометри*, но **най-удачен е непрекъснатия мониторинг** с помощта на радарна (т.3.2.) или геодезическа система, тъй като тоталните станции осигуряват детайлна хронологична информация за посоката и скоростта на преместване в нестабилната зона. *Наклономерите* също могат да бъдат използвани, особено при вертикални премествания в пукнатините на напрежение. Необходимо е да се използват **най-малко три метода**, защото сам по себе си, никой от тях не дава пълна картина.

Величината на нестабилност под повърхността има пряко отношение към вектора на повърхностните премествания. Установяването на такива подповърхностни премествания се извършва с по-просто или усъвършенствано оборудване. Такива са *срезните ленти*, които откриват само мястото на прекъсване в сондажите, без да отчитат неговата скорост и величина, както и *рефлектометрията във времевата област* (т.3.1.). *Екстензометрите* в сондажите показват деформации успоредно на сондажа, а *инклинометрите* измерват ъгловото отклонение, давайки информация за нормалната деформация в него. Оборудването с дълбочинни трикоординатни датчици, за разлика от класическия инклинометър със сонда, е един от най-новите методи за измерването на деформации на земната основа и обектите върху нея. Чрез тях може да се представи формата на масива, който се премества.

Корелацията между налягането в порите и стабилността на откосите е добре установена на теория и надеждно потвърдена на практика. Основно се използват тръбни и/или жични пиезометри, а тяхна успешна алтернатива са пневматичните и кабелните.



фиг.124 Типове скали според геоложките им характеристики

Геоложката структура на находището има съществено значение и за деформациите в масива. В обобщен вид обособяването на различни зони в рудника, според геоложките характеристики на скалите води до *три типа скали* – гранити, диорити и вулканични скали (фиг.124).

По този начин преместванията на реперите, констатирани от непрекъснатите измервания, могат да бъдат обвързани и анализирани съобразно здравината на скалната основа, както и да се търсят корелационни зависимости между различните зони.

5.2. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ПРИ КОНФИГУРИРАНА СИСТЕМА ОТ ДВЕ ТОТАЛНИ СТАНЦИИ

Актуалното разположение и наблюдението на 82 броя репери в три литоложки типа скали (фиг. 124) се отнася за периода от 02.2019 г., когато са стабилизирани реперите, до 05.2020 г. Двете станции от които са извършени измерванията са ST Radar и ST MBI.

❖ Обработка по геоложки зони

Една от възможните предпоставки, които имат пряко отношение към неподвижността на реперите е *здравината на скалите*, в които те са разположени. Във връзка с това по групи поотделно са обработени точките, които попадат в зоните гранити (20 репера), диорити (21 репера) и вулканични скали (41 репера).

Като допълнителни фактори са отчетени влиянието на *вертикалната рефракция* и *взривните работи*, които са специфични за всеки открит рудник. Стръмните визури, особено към близко разположените до двете тотални станции точки, при съществени температурни промени (особено сутрин) са чувствителни към непостоянния коефициент на рефракция, което налага и отчитането на този фактор. Затова обработката освен за непрекъснатите 24-часови измервания в трите зони е извършена и отделно за времеви интервал от 6⁰⁰ до 9⁰⁰ часа.

Взривните работи в рудник “Асарел” се извършват два пъти седмично, в дните вторник и петък в часовете от 14⁰⁰ до 16⁰⁰. Макар и значително по-малко на брой, измерванията в този часови интервал са обработени също отделно.

Общия брой налични измервания, които са използвани е показан в табл. 11.

табл. 11

време показател	0÷24 h	6÷9 h	вторник и петък 14÷16 h
гранити	60508	7046	1495
диорити	70865	8671	1716
вулканични скали	116898	14592	2803
Σ репери	248271	30309	6014

Резултатите от обработените *относителни премествания* по височина, като двумерен и като тримерен вектор, съответно за всички репери за целия период и в двата часови интервала по геоложки зони са показани в табл.12.

табл. 12

	Оценка	0÷24 h			6÷9 h			вторник-петък 14÷16 h		
		dH, m	2D, m	3D, m	dH, m	2D, m	3D, m	dH, m	2D, m	3D, m
Гранити	Средно $-\bar{x}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000
	Мин. - x_{min}	-0.140	-0.297	-0.297	-0.068	-0.284	-0.284	-0.041	-0.188	-0.186
	Макс. - x_{max}	0.140	0.341	0.341	0.140	0.303	0.302	0.060	0.187	0.186
	Сигма - σ_x	0.000	0.000	0.000	0.000	0.032	0.032	0.000	0.032	0.032
Диорити	Средно $-\bar{x}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
	Мин. - x_{min}	-0.194	-0.199	-0.211	-0.121	-0.151	-0.106	-0.027	-0.138	-0.132
	Макс. - x_{max}	0.195	0.199	0.181	0.077	0.163	0.163	0.024	0.090	0.073
	Сигма - σ_x	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Вулканични скали	Средно $-\bar{x}$	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001
	Мин. - x_{min}	-0.328	-0.338	-0.338	-0.114	-0.307	-0.307	-0.092	-0.207	-0.207
	Макс. - x_{max}	0.138	0.325	0.436	0.087	0.276	0.275	0.074	0.209	0.209
	Сигма - σ_x	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Σ репери	Средно $-\bar{x}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	Мин. - x_{min}	-0.328	-0.338	-0.338	-0.121	-0.307	-0.307	-0.092	-0.207	-0.207
	Макс. - x_{max}	0.195	0.341	0.436	0.140	0.303	0.302	0.074	0.209	0.209
	Сигма - σ_x	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Абсолютните премествания на същите точки са дадени със същите показатели и със своята основна характеристика скорост на преместване при непрекъснати 24-часови наблюдения в табл.13, както и в интервала от 6⁰⁰ до 9⁰⁰ часа и при извършване на взривни работи, пак в табличен вид.

табл. 13

№ на зона/репер	Оценка	dH	2D	3D	V _{dH} ,	V _{2D} ,	V _{3D} ,
		m	m	m	m/ден	m/ден	m/ден
Гранити	$\bar{x}$	-0.048	0.178	0.220	0.000	0.113	0.153
	x_{min}	-0.813	0.000	0.000	-1.063	0.000	0.001
	x_{max}	0.391	1.420	1.575	0.814	2.856	2.863
	σ_x	0.239	0.318	0.378	0.100	0.253	0.251
Диорити	$\bar{x}$	0.042	0.447	0.524	0.000	0.056	0.072
	x_{min}	-1.034	0.000	0.000	-1.186	0.000	0.000
	x_{max}	0.336	1.751	2.023	0.434	1.665	1.665
	σ_x	0.300	0.523	0.540	0.055	0.145	0.148
Вулканични скали	$\bar{x}$	0.072	0.256	0.321	-0.002	0.097	0.125
	x_{min}	-1.126	0.000	0.000	-1.244	0.000	0.000
	x_{max}	0.397	2.801	2.878	0.816	3.705	3.761
	σ_x	0.212	0.381	0.397	0.077	0.228	0.228
Σ репери	$\bar{x}$	0.034	0.291	0.354	-0.001	0.088	0.114
	x_{min}	-1.126	0.000	0.000	-1.244	0.000	0.000
	x_{max}	0.397	2.801	2.878	0.816	3.705	3.761
	σ_x	0.251	0.427	0.454	0.071	0.214	0.214

Допълнително като критерий при анализа е използвана надморската височина на точките, поради което условно реперите са групирани в четири височинни пояса, кратни на 15 m (височина на стъпало). Броят на измерванията във всяка група е показан в табл. 16, като отново са запазени часовите интервали, аналогични на разделянето по геоложки зони.

табл.16

време показател, m	0÷24 h	6÷9 h	вторник и петък 14÷16 h
H <795	76794	9636	1879
H 795÷900	110375	13253	2890
H 900÷1005	35059	4225	686
H >1005	26043	3195	559
Σ репери	248271	30309	6014

Относителните премествания по геоложките зони за всичките 82 точки, както и абсолютните премествания с техните скорости, оценени и сравнявани със статистическите характеристики $\bar{x}$ и σ_x са обработени в зависимост от височинния пояс, в който попадат, по аналогичен начин.

Задълбоченият анализ на получените резултати за относителните премествания по геоложки зони показва, че по абсолютна стойност те са най-значими при вулканичните скали, които основно са в североизточния край на рудника и в най-ниските му участъци - от порядъка на около 40 cm. Най-малки са при диоритите в дъното на котлована. Очаквано средните стойности са почти равни на 0, както и техните средни квадратни отклонения, тъй като положителните и отрицателните се компенсират съгласно едно от основните свойства на случайните грешки.

Преместванията по височина са чувствително по-малки в сравнение с двумерния вектор, поради факта, че масива по принцип е устойчив, но призмите са върху метални стойки (по-високо над терена) и атмосферните условия пряко влияят.

При групирането на точките по височина се запазва същата тенденция, като максималните стойности са по-ниски, поради значително по-еднородните условия за всеки височинен пояс.

Абсолютните премествания, т.нар. *кумулятивен ефект* и при двата подхода за групиране дават значително по-разнообразна информация. Най-значими са преместванията при вулканичните скали, докато за точките с надморска височина от 900 до 1005 m те са най-малки. Най-големите скорости на преместване и при двата критерия за групиране се наблюдават при сутрешните измервания. Това е така не защото точките са нестабилни, а заради значимото влияние на вертикалната рефракция и по-големите грешки при измерванията. Това е особено валидно за вертикалните премествания, при които котите се определят с тригонометрична нивелация.

Взривните работи, които се извършват при добра организация, не влияят върху отклоненията на преместванията от средните им стойности за целия период от време. При тях негативният ефект е по-скоро от запрашаването, което пречи на добрата видимост от станциите към призмите.

Отделните значими максимални и минимални стойности, както се вижда от таблиците, достигащи 2-3 m (такива са реперите с номера 66 в източната и 82 и 83 в югоизточната част на рудника), са резултат от технологията на изземване, при която един малък участък, където е призмата, може да се свлече, което се регистрира от непрекъснатото измерващата станция. В действителност това не нарушава стабилитета на целия откос, а впоследствие призмата се премахва и евентуално се поставя нова. Оттук, заради тези значими стойности, са и скоростите 0.10-0.20 m/ден без реално да има опасност.

Изводи и предложения

1. Резултатите, като числени стойности и характеристики потвърждават стабилитета на откосите в рудник "Асарел".

2. Рефракцията има своето значимо влияние върху резултатите, особено в ранните сутрешни часове. Препоръчителна е промяна в часовия график за измервания на тоталните станции – по възможност да се пропуска часовия интервал от 5⁰⁰ до 9⁰⁰ h, или поне да не се взема предвид при обработката.
3. Взривните работи не са ограничаващ фактор и почти не оказват влияние върху движението на откосите – отражението е локално, а не глобално. Да продължи заснемането на взривните полета веднага след взривяването.
4. Едно предложение за мониторинга в зависимост от точността на системата, скоростта на движение и критичността на зоната е показано в табл. 21 (допълнителни измервания се препоръчват при масови взривни работи и продължителни, и обилни валежи).

табл. 21

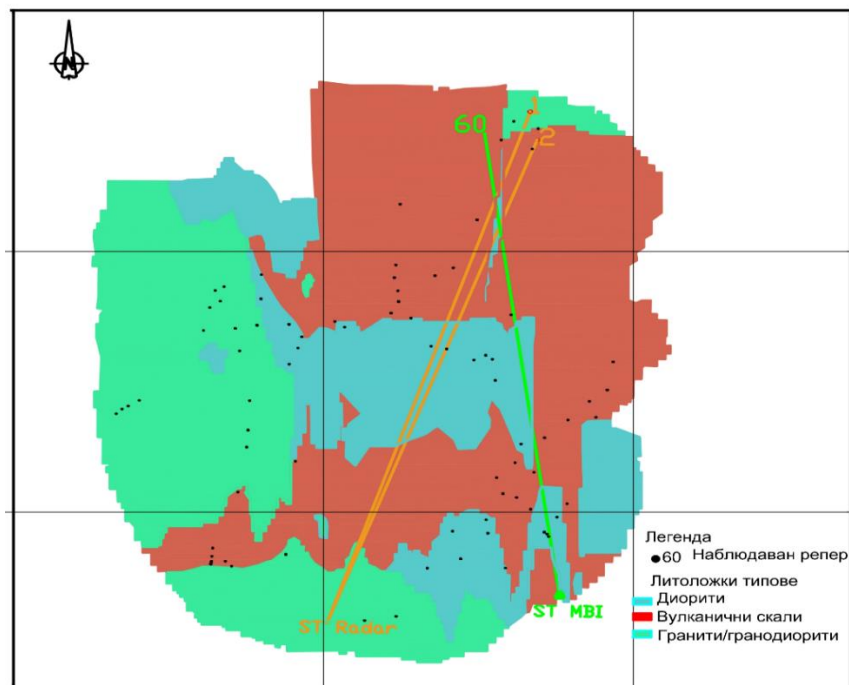
Рудо-добив	Скорост откос (m/d)	Честота на визуалния преглед	Честота на отчитане на екстензометрите	Честота на картиране на пукнатини	Честота на заснемане на призмите	Честота на отчитане на пиезометрите
Активен	< 0.003	Ежедневно	Ежеседмично	Еже-	Еже-	Еже-месечно
	0.003-0.015	Ежедневно	Ежедневно	Еже-седмично	2 пъти месечно	Еже-месечно
	0.015-0.061	При всяка смяна	Ежедневно с устройство за непрекъснат запис	Еже-седмично	Еже-седмично	Еже-седмично
	> 0.061	2 пъти на смяна	2 пъти на ден със записващо устройство	Ежедневно	Ежедневно	2 пъти седмично
Неактивен	< .003	Ежеседмично	Ежемесечно	Еже-месечно	Еже-месечно	Еже-месечно
	0.003-0.015	Ежеседмично	Ежеседмично	Еже-месечно	Еже-месечно	Еже-месечно
	0.015-0.061	Ежедневно	2 пъти седмично със записващо устройство	Еже-седмично	2 пъти месечно	Еже-месечно
	0.061-0.152	Ежедневно	Ежедневно с устройство за непрекъснат запис	2 пъти седмично	Еже-седмично	Еже-седмично
	> 0.152	2 пъти на ден	Ежедневно с устройство за непрекъснат запис	Ежедневно	Ежедневно	2 пъти седмично

5. Окончателните заключения следва да се вземат след минимум дублиране на информацията, примерно от линейния радар, при зададени подходящи прагови нива на чувствителност.
6. Най-напред се измерват очевидните неща, защото преместването на повърхностите е най-директният и най-критичен аспект на нестабилността на откосите.
7. По-простото е по-добро - прилагането на най-обикновени технически средства (ролетка и един или два кола като при жичния екстензометър) има понякога по-съществено значение пред електронното дистанционно отчитане (сложното техническо оборудване е много по-уязвимо).

❖ Съвместни наблюдения на едни и същи репери от двете станции

От геодезическа гледна точка сравняването на различни модели, получени при заснемане на определена територия от различни места е удачно да се извърши чрез използването на общи точки, заснети по едно и също време. Същото е валидно и при изработването на модела на повърхностните премествания, на база мониторинга на деформационните процеси.

В случая за рудник “Асарел” местата са роботизирани тотални станции (ST Radar и ST MBI), а наблюдаваните общи точки са реперите с №№ 1, 2 и 60 (фиг. 125), в североизточния край на рудника. На тези репери са поставени по още една допълнителна призма, насочена към другата станция. За репери 1 и 2 новите призми “гледат” (са ориентирани) към ST MBI, а за репер 60 - към ST Radar. Височината на призмите е приблизително 1 m, което и тук не е от съществено значение, а с оранжево и зелено са визуирите към точките, които по принцип се наблюдават.



фиг. 125 Схема с наблюдаваните общи репери

Една от точките попада в скали от тип гранити, а другите две са във вулканични, т.е. здрави скали. Координатите и котите на тези три точки са определени при стандартното заснемане от съответната станция с периодичност около 1 h. Периодът на съвместните наблюдения е от 04.08.2020 до 20.09.2020 год. За някои от дните в определени часове липсва информация заради атмосферните условия, основно мъгла (в рудника е често явление) и дъжд, когато станцията “не вижда” призмите.

Обработените резултати от измерванията (не за целия период), по аналогичен като в т. 5.2.1. начин са дадени в табл. 22 за репер 1, в табл. 23 за репер 2 и в табл. 24 за репер 60.

P1

табл. 22

показател	ST Radar			ST MBI			ST Radar - предходни		
	dH, m	2D, m	3D, m	dH, m	2D, m	3D, m	dH, m	2D, m	3D, m
Средно $\bar{x}$	0.380	0.387	0.542	-0.091	0.659	0.665	0.230	0.218	0.317
Мин. - x_{min}	0.361	0.374	0.527	-0.122	0.613	0.618	0.147	0.100	0.194
Макс. - x_{max}	0.426	0.397	0.580	-0.074	0.780	0.785	0.391	0.402	0.517
Сигма - σ_x	0.000	0.000	0.000	0.000	0.055	0.055	0.055	0.063	0.077

P2

табл. 23

показател	ST Radar			ST MBI			ST Radar - предходни		
	dH, m	2D, m	3D, m	dH, m	2D, m	3D, m	dH, m	2D, m	3D, m
Средно $\bar{x}$	0.393	0.375	0.544	-0.076	0.628	0.632	0.243	0.213	0.324
Мин. - x_{min}	0.371	0.331	0.510	-0.099	0.594	0.597	0.162	0.120	0.212
Макс. - x_{max}	0.424	0.385	0.571	-0.059	0.752	0.757	0.387	0.421	0.523
Сигма - σ_x	0.000	0.000	0.000	0.000	0.045	0.045	0.045	0.055	0.077

P60

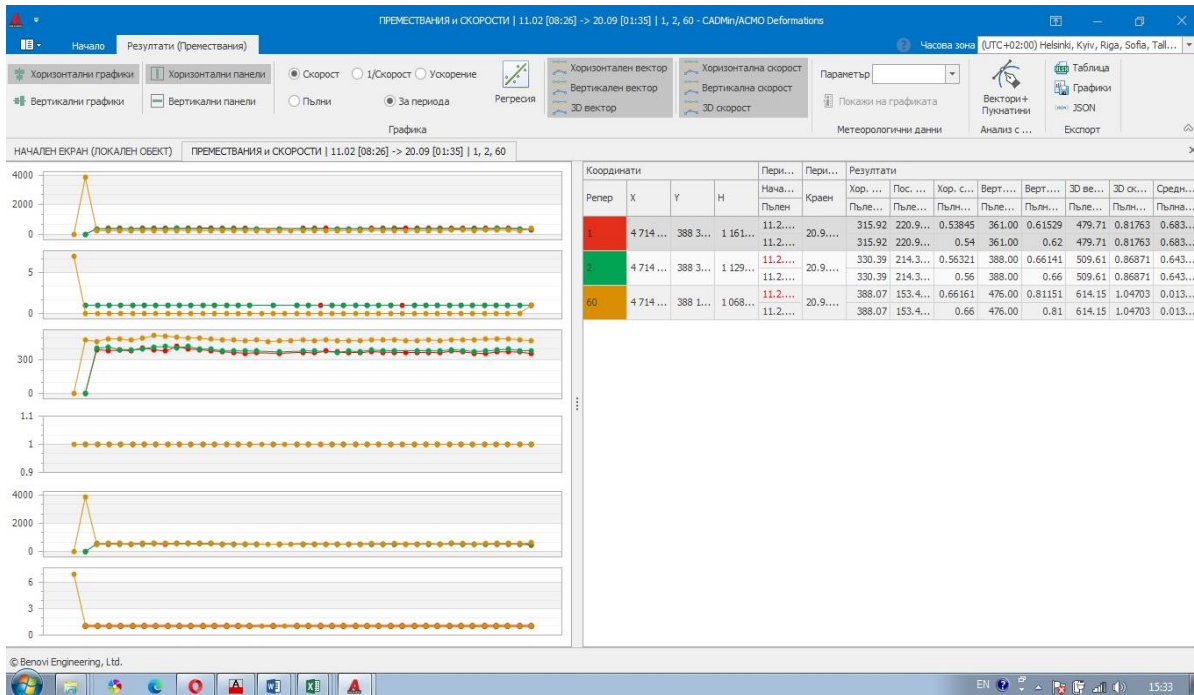
табл. 24

показател	ST Radar			ST MBI			ST Radar - предходни		
	ΔH , m	2D, m	3D, m	dH, m	2D, m	3D, m	dH, m	2D, m	3D, m
Средно $\bar{x}$	0.487	0.258	0.551	0.022	0.305	0.306	0.017	0.152	0.154
Мин. - x_{min}	0.472	0.241	0.532	0.005	0.262	0.264	-0.020	0.003	0.003
Макс. - x_{max}	0.524	0.388	0.614	0.040	0.418	0.418	0.098	0.625	0.625
Сигма - σ_x	0.000	0.000	0.000	0.000	0.055	0.055	0.000	0.055	0.055

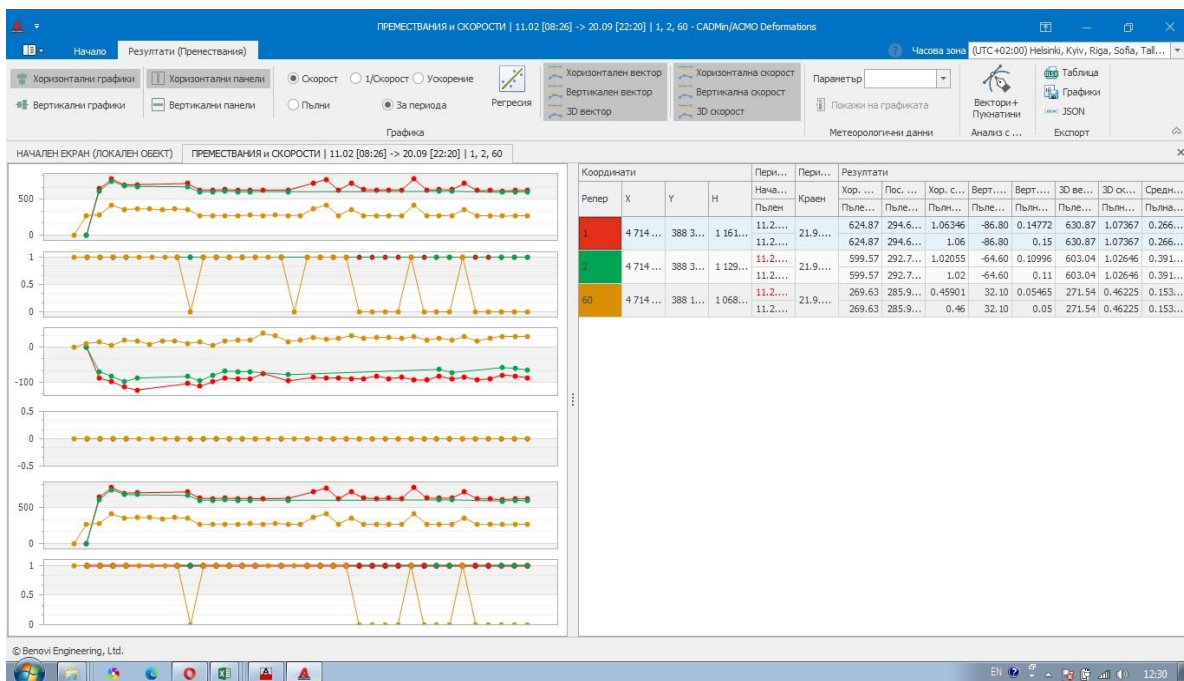
В случая най-представителни са данните от последната колона “предходни” заради по-големия брой измервания, потвърждение за което са и малките стойности на стандартните отклонения. Като правило когато измерванията са от базовата точка (за P1 и P2 от ST Radar, а за P60 от ST MBI) резултатите са много по-близки до тях. Значимите стойности на някои числени характеристики са заради малкото обработени измервания, а те са малко на брой заради факта, че резултатите получени от ST MBI значително се отклоняват

(почти двойно) от тези от другата тотална станция. Внимателната проверка показва, че тази станция дава грешни резултати.

До аналогични заключения може да се стигне и при анализа на абсолютните (кумулативни) преместванията и техните скорости със специализирания софтуер CADMin АСМО по височина, като двумерен и като тримерен вектор - фиг. 126 и фиг. 127.



фиг. 126 Кумулативни премествания – станция ST Radar



фиг. 127 Кумулативни премествания – станция ST MBI

Преместванията за P1 и P2 и в шестте графики (по три за всяка точка) почти съвпадат или са много близки, а за точка P60 отклоненията са само във височинно направление при измерванията от ST MBI. От другата тотална станция това е валидно за всички вектори за P60, което категорично потвърждава заключението, че проблемите са от функционирането на тоталната станция ST MBI.

Тъй като непрекъснатите спътникови измервания (всяка станция е оборудвана с ГНСС приемник) показват, че изходното положение на стълбовете за наблюдение е неизменно, причината е технически проблем със самата тотална станция. На практика след този момент (септември 2020 г.) тя не се използва, а са поставени допълнителни призми за наблюдение от другата станция (там където има възможност/видимост).

Изводи

1. Съвместните наблюдения подобряват в качествено отношение модела на повърхностните премествания.
2. При наличие на монтирани призми, потвърждение за нарушен стабилитет на откосите, т. нар. “дублиране” на информацията, освен с радарната интерферометрия, се гарантира и по предложения/описания начин.
3. Такива наблюдения, заради мониторинга с непрекъснати измервания, премахват до известна степен и неблагоприятното въздействие на средата и атмосферните условия.
4. Този подход позволява, както в случая, установяване на технически проблеми с използваното инструментално оборудване.

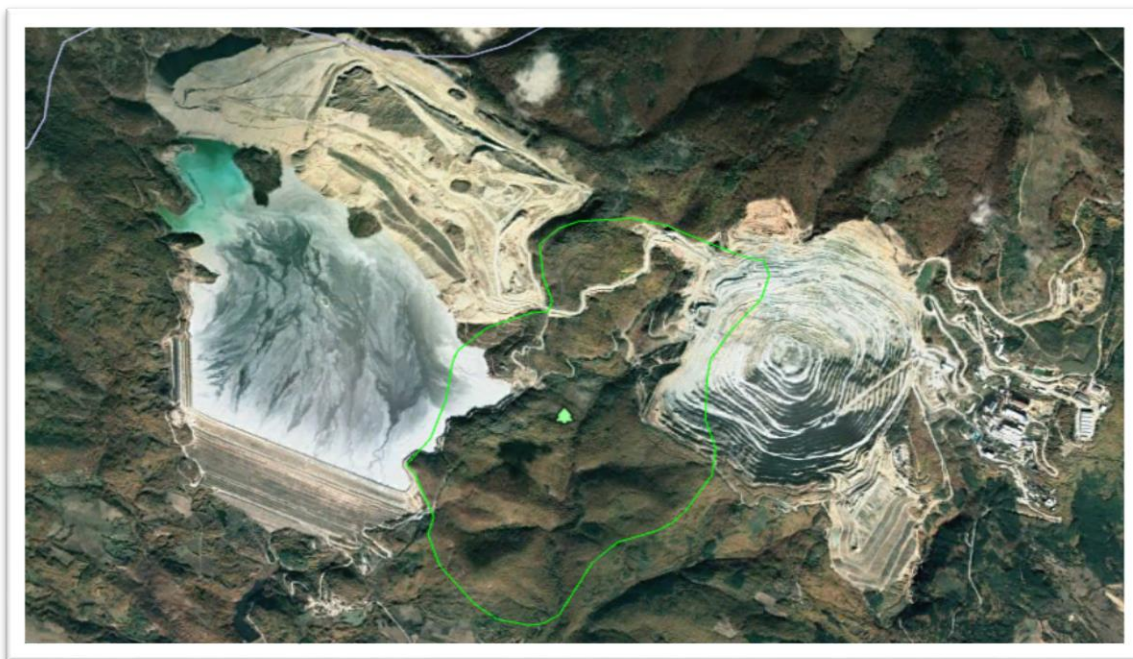
❖ Наблюдение на стената на хвостохранилището

Като важен обект от цялостната експлоатация на рудник “Асарел” се явява и хвостохранилището, което се намира на запад от рудника (фиг. 128). Стената, оформена във вид на няколко стъпала е в южната му част.

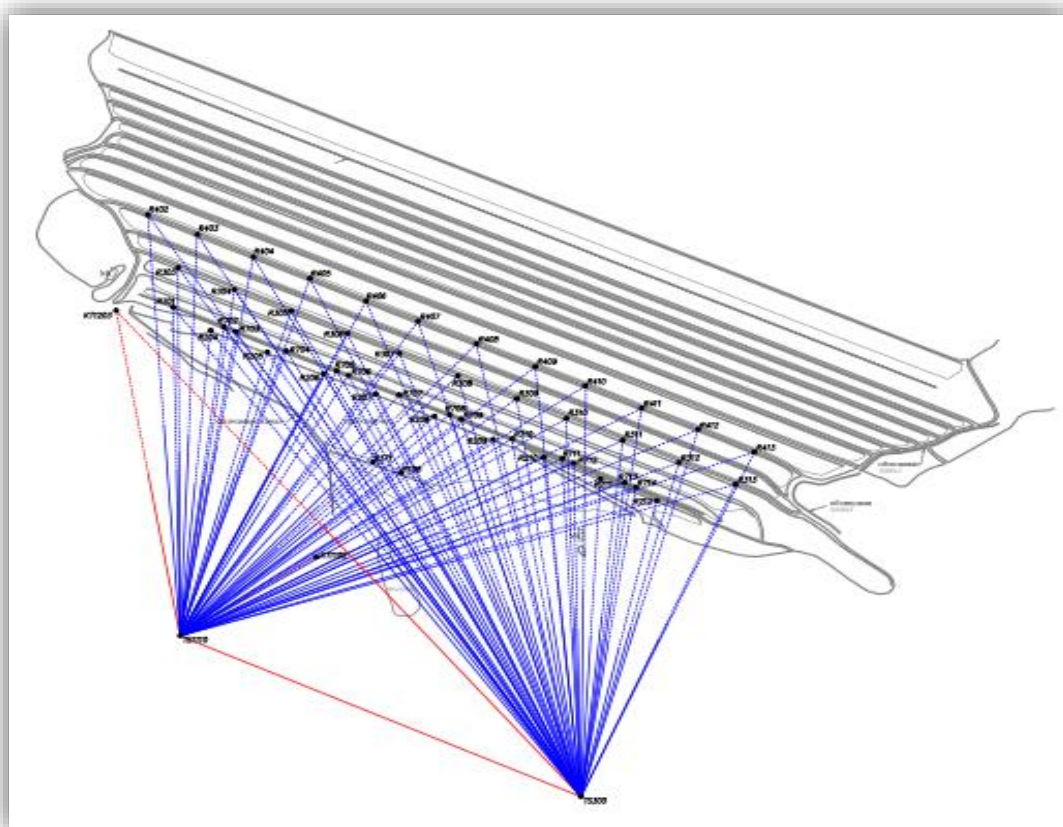
По своята същност хвостохранилището е с особено значение по отношение екологичната безопасност на региона. Затова и тук се налагат периодични наблюдения (измервания) за установяване наличието на евентуални деформационни процеси и навременното вземане на адекватни мерки. Поради увеличаването на обема му, такава програма за мониторинг за състоянието на стената му стартира от есента на 2020 год.

Във връзка с това са поставени призми за наблюдение на четири от стъпалата по стената на хвостохранилището, както е показано на фиг. 129. Наблюденията се извършват от две места - станции TS1110 и TS300 - от стълбове, снабдени с устройства за принудително центриране. Общият брой наблюдавани контролни точки е 46, разположени по четири стъпала в створ (особено важно и за обработката!).

Измерванията са извършени в един ден и за двете станции. Към момента на обработка са направени два цикъла от измервания - през м. септември и след 3 месеца в началото на декември.



фиг. 128 Карта на разположението на рудника и хвостохранилището



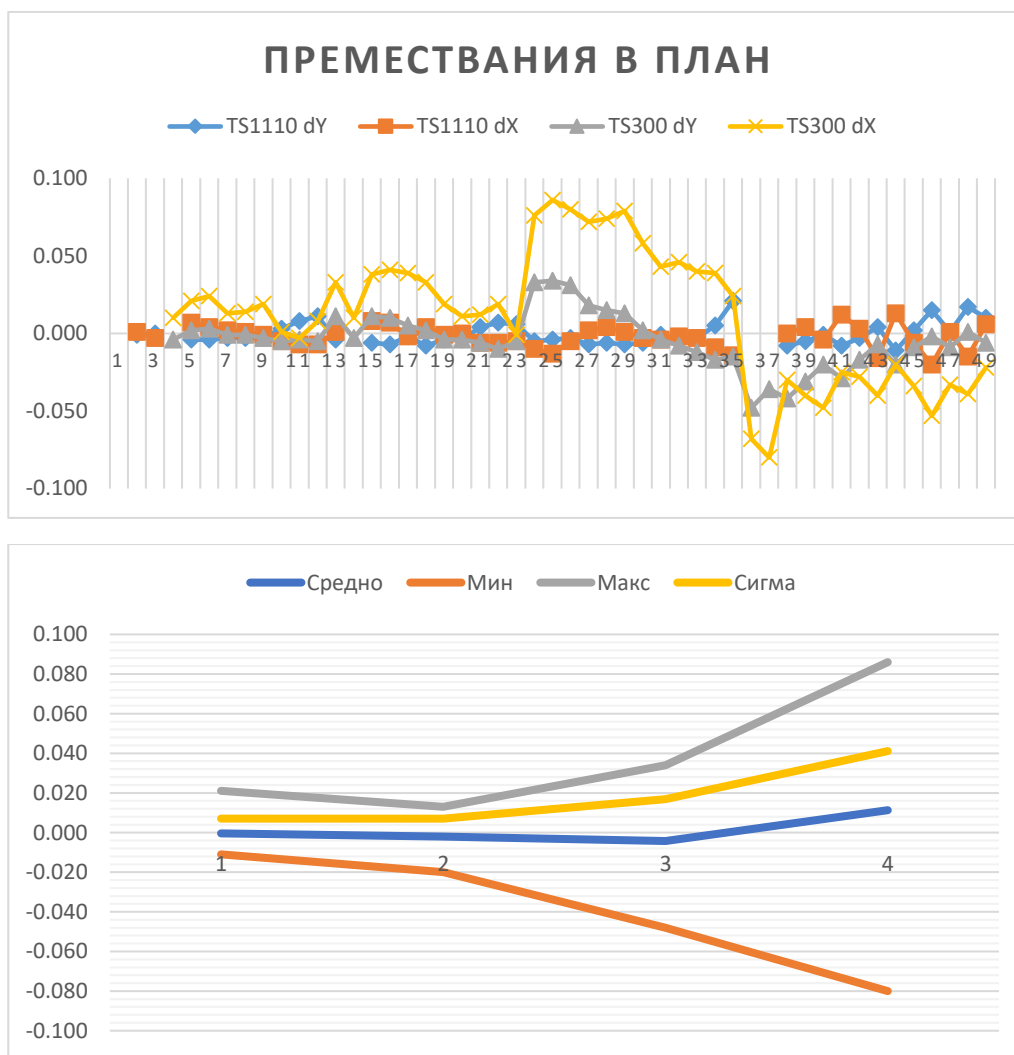
фиг. 129 Контролни точки по стената на хвостохранилището

Началният етап на наблюденията предполага и оценка в преместванията на наблюдаваните контролни точки само в хоризонтално отношение, което е показано в табл. 25 като разлика в координатите им.

табл.25

Станция №	TS1110		TS300	
Оценка	dY, m	dX, m	dY, m	dX, m
Средно - $\bar{x}$	0.000	-0.002	-0.004	0.011
Мин. - x_{min}	-0.011	-0.020	-0.048	-0.080
Макс. - x_{max}	0.021	0.013	0.034	0.086
Сигма - σ_x	0.007	0.007	0.017	0.041

Графичното онагледяване (CADMin АСМО) за всички точки и от двете станции е дадено на фиг. 130.



фиг.130 Премествания в план на контролните точки по стената

Установените премествания за станция TS1110 са групирани в диапазона ± 2 mm което показва стабилно състояние на стената. Правят впечатление значително по-големите стойности при измерванията от станция TS300, достигащи до 80 mm. Тъй като измерванията са извършени с един и същ инструмент, по-скоро причината може да бъде в неизменното положение на стълба за наблюдение и устройството за принудително центриране. Това много добре се потвърждава и от числените стойности за двумерния вектор (2D) и скоростта му (табл. 26).

табл. 26

показател характеристика	TS1110		TS300	
	2D, mm	V _{2D} , mm/ден	2D, mm	V _{2D} , mm/ден
Средно - $\bar{x}$	37.159	0.458	38.981	0.481
Мин. - x_{min}	0.000	0.000	5.000	0.062
Макс. - x_{max}	86.371	1.064	92.477	1.140
Сигма - σ_x	22.706	0.279	24.755	0.302

За точките разположени в най-ниската част от стената, заради стръмните визури (точки с №№ 701-714), допълнително са определени т. нар. относителни деформации, показани в табл. 27.

табл. 27

Репер	След втория цикъл ST1110		След втория цикъл ST300		ST1110	ST300
№.	X	Y	X	Y	Относителни хоризонтални, mm/m	
701			4 712 395.022	384 060.187		0.0
702			4 712 356.281	384 141.374		0.1
703	4 712 347.403	384 159.777	4 712 347.453	384 159.841	0.0	-99.2
704	4 712 308.815	384 241.066	4 712 308.858	384 241.135	0.0	-51.5
705	4 712 270.441	384 321.728	4 712 270.476	384 321.796	-5.7	-65.2
706	4 712 261.611	384 340.229	4 712 261.647	384 340.286	-14.6	-77.2
707	4 712 222.952	384 421.439	4 712 222.980	384 421.493	2.8	-52.5
708	4 712 184.422	384 502.398	4 712 184.438	384 502.446	-7.4	-60.4
709	4 712 175.640	384 520.750	4 712 175.653	384 520.804	-27.6	-75.5
710	4 712 136.987	384 602.016	4 712 136.998	384 602.060	5.0	-51.9
711	4 712 098.570	384 682.752	4 712 098.585	384 682.790	-17.7	-69.2
712	4 712 089.683	384 701.129	4 712 089.691	384 701.170	-35.9	-89.4
713	4 712 051.110	384 782.405	4 712 051.120	384 782.435	-10.9	-68.3
714	4 712 042.494	384 800.466	4 712 042.497	384 800.502	-32.3	-78.1

Когато преместванията са с отрицателен знак, като в случая, говорим за *свиване* (компресия). Отново от станция ST300 тези хоризонтални относителни деформации са значителни. Вероятната причина, освен неустойчивото положение на стълба за наблюдение

и проблемите с центрирането, може да бъде и конфигурацията на мрежата - силно изтеглените паралактични триъгълници, които се получават от станцията и две съседни точки от створа.

Изводи и препоръки

1. Хвостохранилището, като важен обект, тясно свързан с експлоатацията на находище “Асарел ” е в добре състояние, което не налага допълнителни мерки по неговото укрепване.
2. Приблизителната честота на наблюденията през три месеца, която кореспондира с темповете на неговото запълване, осигурява достатъчна надеждност на заключенията.
3. Целесъобразно е да продължат наблюденията и на връзката му с рудника, т.е. на хвостопровода, чиято сигурност е от същата важност.
4. Уместно е да се извършва съвместна обработка на измерванията на точки по хвостопровода, извършвани от роботизирани тотални станции, с тези за контролните точки по стената на хвостохранилището.

❖ Корелационен анализ на резултатите от измерванията по групи точки

С цел анализ на състоянието на масива, на базата на статистически данни, са избрани 5 групи точки, разположени в различни части на рудника (фиг. 124). Всички те попадат в скали от тип гранити, в близост до контактната зона с другите геоложки типове.

Като характерен показател за всяка от точките, изменението на който достатъчно добре представя поведението ѝ, е използван тримерния вектор (3D). Обработката е извършена с приложния софтуерен продукт STATGRAPHICS, а основните числени характеристики за всяка група са дадени в табличен вид като за група 1 (табл. 28) и група 2 (табл. 29).

Група 1

табл. 28

№ на точка	52	50	51
брой резултати	1941	1567	1285
средно	0.024	0.023	0.018
медиана	0.020	0.020	0.014
мода	0.018	0.018	0.015
дисперсия	0.000	0.000	0.000
стандартно отклонение	0.017	0.015	0.017
коефициент на вариация	71.33%	62.85%	91.77%
минимум	0.003	0.002	0.002
максимум	0.101	0.088	0.085
размах	0.098	0.086	0.083
асиметрия	2.425	2.835	3.158
ексцес	5.666	8.596	9.236

Група 2

табл. 29

№ на точка	54	72	65	47	66	44	46
брой резултати	2271	3694	3591	2223	2939	3480	2248
средно	0.104	0.102	0.092	0.046	1.038	1.449	0.051
медиана	0.097	0.097	0.105	0.036	1.044	1.446	0.041
мода	0.096	0.093	0.106	0.035	1.061		0.039
дисперсия	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
стандарт	0.031	0.014	0.028	0.028	0.025	0.044	0.025
коефициент на вариация	30.22%	14.26%	30.09%	60.38%	2.36%	3.07%	49.19%
минимум	0.086	0.074	0.016	0.022	0.941	1.362	0.026
максимум	0.407	0.197	0.217	0.129	1.117	1.575	0.131
размах	0.321	0.123	0.201	0.107	0.176	0.213	0.105
асиметрия	7.936	1.557	-0.654	2.141	-0.765	0.926	2.046
ексцес	69.328	2.100	2.025	2.821	0.131	0.514	2.533

Стандартизираните стойности на асиметрията и ексцеса за по-голяма част от точките дават основание за обосновано предположение за нормално разпределение на стойностите на тримерния вектор. Големите стойности на коефициента на вариация в някои случаи са предопределени от технологията на добива, без видимо да е нарушен стабилитетът на откосите. Най-значимите максимални стойности са за точките от група 2 и 3, които за съответния период попадат в зоните на активно изземване на минна маса.

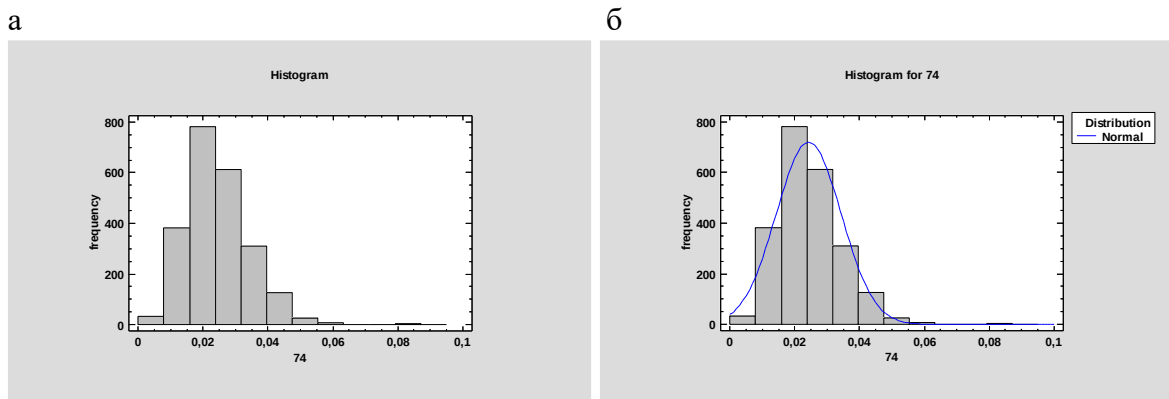
За стабилно състояние на съответната зона, както и за проблеми в отделни нейни участъци, друг показател който може да се използва са *коефициентите на корелация* между точките от всяка група (пример с табл. 35).

табл. 35

	52	50	51			
52		0,9187 (1567)	0,9178 (1285)			
		0,0000	0,0000		1	2
50	0,9187 (1567)		0,9808 (1281)	1		0,9535 (3237)
	0,0000		0,0000			0,0000
51	0,9178 (1285)	0,9808 (1281)		2	0,9535 (3237)	
	0,0000	0,0000			0,0000	

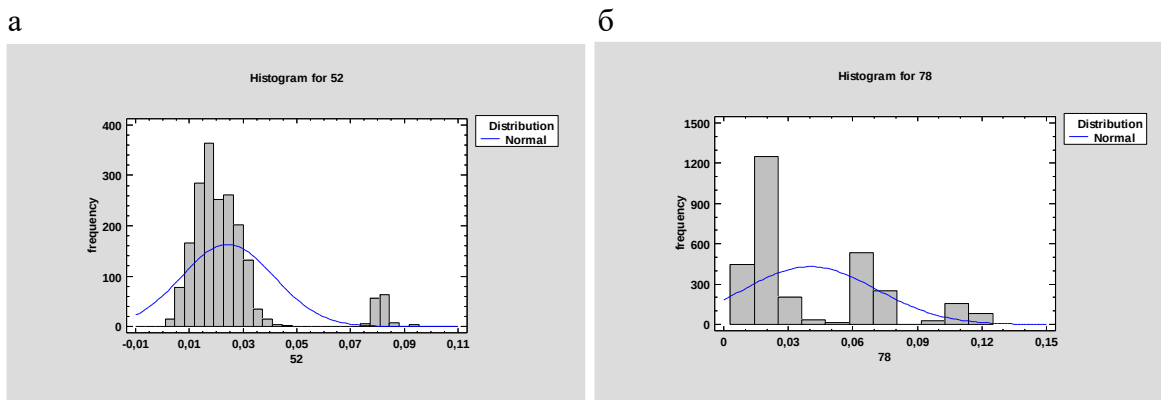
С удебелен шрифт са коефициентите гарантиращи надеждността на определените стойности за линейна корелация между точките от групата (ако те са <0.05 надеждността е над 95%, в случая е почти 100 %). Корелацията между параметрите на точките в групата показва равномерна проява на преместванията при тях, а некорелираните стойности потвърждават случайния характер на величините.

Разпределението на стойностите на тримерния вектор за всяка точка е в основата на теста за тяхното нормално разпределение. На база групиране на стойностите са изработени съответните таблици и хистограми за всички точки, както за т.74. (фиг. 132 а, б).



фиг. 132 Разпределение на стойностите на тримерния вектор за т. 74

В случая това е едно типично модално разпределение, с ясно изразено пикова стойност - около една трета от точките са с такова разпределение. За другите точки при разпределението се наблюдават повече от един пик, като говорим за *полимодално разпределение* (фиг.133).



фиг. 133 Пример за бимодално и тримодално разпределение от анализирани групи

Наличието на повече от една върхова стойност показва наличие на *данни с различен генезис* (или *нееднородни данни*). Във връзка с това тези допълнителни групи от данни (при втория или третия пик), извън основната, отчитайки мястото им в табличното разпределение, са анализирани по отношение на времето (момента на тяхното проявяване). Голяма част от стойностите на тези тримерни вектори, за някои точки като 1, 3, 44 над 50 % и особено за точки разположени на ниски хоризонти (стръмни визури!), попадат в диапазона на сутрешните измервания (по-разширен разбира се), при чувствителното влияние на

вертикалната рефракция. Филтрацията на дните, когато са провеждани взривните работи (вторник и петък) не показва никакво тяхно значимо присъствие.

Друга характерна особеност, която се наблюдава е големия брой дни, основно от зимните месеци и късната есен и ранната пролет, когато са тези отклонения. Това е времето на по-интензивните валежи (дъжд и сняг) и мъглите. Месечната справка за валежите потвърждава това. Макар и стабилизирани добре, отделни точки, респективно призмите, могат да се преместят заради това, без да има проблем със стабилитета на откосите. Лошите условия пречат и на видимостта от станциите до реперите – липсват записи и данни. В действителност няма нито една дата от летните месеци, в която да се появяват такива пикови стойности.

Това е индикация за наличие на *сезонен тренд*, в основата на който стои неблагоприятното влияние на вече изброените по-горе атмосферни условия.

За по-задълбочен анализ на същия този тримерен вектор, разглеждан като временен ред от случайни величини, може да се използва и корелационната, респективно автокорелационната функция (АКФ). Изчислени са стойностите на автокорелационната функция за всички точки, както за т.51 (табл. 36).

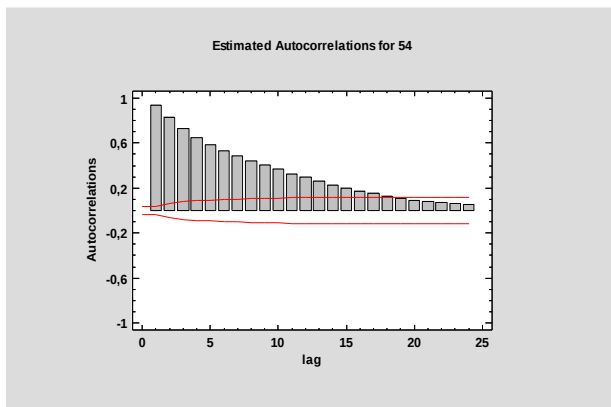
табл. 36

			95% вероятност	95% вероятност
стъпка	автокорелация	станд. грешка	-2 σ	+2 σ
1	0,5524	0,0278	-0,0546	0,0546
2	0,4100	0,0353	-0,0693	0,0693
3	0,3191	0,0388	-0,0762	0,0762
4	0,2619	0,0408	-0,0801	0,0801
5	0,1988	0,0421	-0,0826	0,0826
6	0,1664	0,0428	-0,0840	0,0840
7	0,1673	0,0433	-0,0850	0,0850
8	0,1749	0,0438	-0,0860	0,0860
9	0,1439	0,0444	-0,0870	0,0870
10	0,1275	0,0447	-0,0877	0,0877
11	0,0747	0,0450	-0,0883	0,0883
12	0,0727	0,0451	-0,0885	0,0885
13	0,0624	0,0452	-0,0886	0,0886
14	0,0739	0,0453	-0,0888	0,0888
15	0,1108	0,0454	-0,0890	0,0890
16	0,1210	0,0456	-0,0894	0,0894
17	0,0910	0,0458	-0,0899	0,0899
18	0,0873	0,0460	-0,0901	0,0901
19	0,0701	0,0461	-0,0904	0,0904
20	0,0477	0,0462	-0,0905	0,0905
21	0,0478	0,0462	-0,0906	0,0906
22	0,0200	0,0462	-0,0907	0,0907
23	0,0087	0,0463	-0,0907	0,0907
24	0,0457	0,0463	-0,0907	0,0907

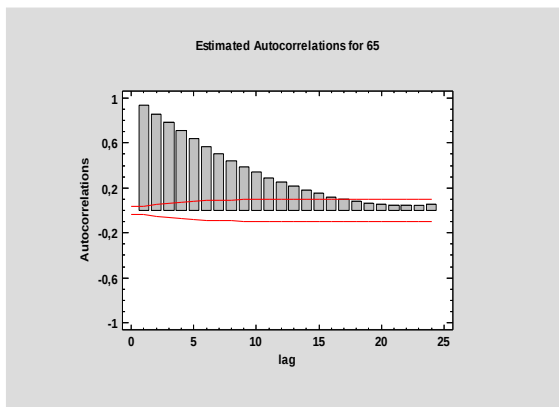
Целият времеви период е разделен в случая на 24 стъпки. В последните две колони е даден интервала за границите на статистически значима корелация (-2σ , $+2\sigma$), при ниво на вероятност 95%.

Анализът на графиките на АКФ за всички изследвани точки показва, че в повечето случаи (т.46, 54, 62, 64, 66) процесът е *стационарен и ергодичен* (фиг. 134 а, б), а някои (напр. т.47 и т.51) (фиг. 134 в, г) свидетелстват за *квазипериодичен характер* на изменение.

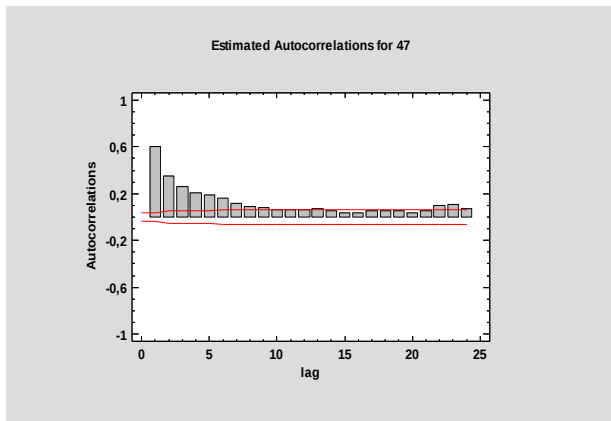
а



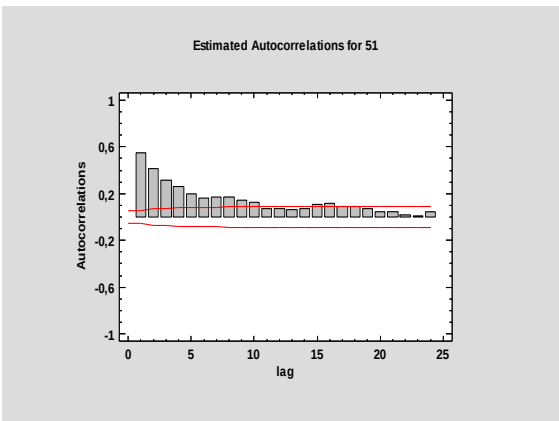
б



в



г



фиг. 134 АКФ при стационарен процес (а,б) и процес с квазипериодичен характер (в,г)

Изводи

1. Корелационният анализ дава възможност за изследване наличието / отсъствието на връзка и нейната значимост между показателите за всяка от точките, попадащи в обособена група за даден тип скала в различните участъци от рудника.
2. При доказана надеждна връзка и нейния вид, моделът на зависимостта може да бъде използван за прогнозиране за определени точки по данни за други (пространствено определени чрез геодезически измервания), в случай на невъзможност за реализация на програмата за мониторинг.

3. Използването на точки в близост до контактни геоложки зони показва, че технологията на добива (с най-ефективно използване на багерите, гарантиране минимална ширина на бермите и др.) когато се изземва скална маса от различни геоложки типове скали, с цел осигуряване изпълнението на годишния проект, не нарушава състоянието на откосите в работните участъци.
4. Основните проблеми при генерирането на окончателни резултати, на база стотици хиляди измервания, са в резултат до голяма степен и на влиянието на атмосферните условия и сезонните промени.
5. Оптималното разположение и броят на наблюдаваните репери са в основата на окончателните заключения по отношение сигурността и стабилитета на откосите.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Безспорните предимства на открития добив на подземни богатства гарантират неговото ускорено развитие и все по-успешно прилагане, осигурявайки по-голяма производителност при ниска себестойност на продукцията, както и по-добри и безопасни условия на работа.

Дефинираните основни характеристики на системата “открит рудник”, която е динамична и инерционна, имаща стохастичен характер, налагат съответно управление при развитието на минните работи, особено важна част от което са маркшайдерските наблюдения, свързани с установяването и контрола на потенциални деформационни процеси в скалния масив.

Конфигурацията на една цялостна система, включваща роботизирани тотални станции, ГНСС приемници, потвърждаващи неизменността на изходните данни, допълнена с наземна радарна интерферометрия и лазерни скенери дава възможност не само за ранно известяване, но и за надеждни заключения и адекватни решения (вкл. действия) при необходимост. Този комплексен подход позволява така необходимото “дублиране”, съвместяване и съпоставка на информацията – премествания, регистрирани от станциите и потвърдени от линейния радар, както и изработването на модели (от сканирането). А изобщо активните дистанционни методи за наблюдение осигуряват непрекъснатост на процеса (денонощно, целогодишно), при достатъчно висока точност и гарантирана надеждност.

Базови геодезически измервания (посоки, дължини и превишения) са в основата на голяма част от изводите и препоръките за рудник “Асарел”. Крайните резултати до голяма степен зависят от геоложките и хидрогеоложките условия в района и за отделни участъци, както и от метеорологичната обстановка. Плановото положение на реперите основно зависи от точността на измерените посоки, а техните коти от точността, с която се измерват зенитните ъгли, без да има значимо влияние на наклонените разстояния. С цел намаляване влиянието на вертикалната рефракция основната препоръка е към обработка на наблюдения през тъмната част от денонощието. Взривните работи, извършвани два пъти седмично, нямат пряко влияние върху устойчивостта на откосите. Критичността на зоната на

добивните работи и скоростта на движение на контролните репери налагат понякога промяна в методиката за мониторинг, според предложената в последната глава.

Съвместните наблюдения на едни и същи точки от различни станции гарантират надеждността на модела на деформациите и на техническите характеристики на апаратурата, както и премахват влиянието на средата и атмосферните условия. Корелационният анализ позволява установяване на значимостта на връзките между отделните статистически показатели за наблюдаваните точки, а оттук и възможност за прогнози в поведението на други точки. Оптималното разположение на реперите (такива се поставят при разработване на всеки нов участък) и станциите, осигуряват максимално подобие в деформационния модел.

Анализът и тълкуването на резултатите от извършените маркшайдерски измервания и определените деформации приоритетно трябва да се извършват от тези, които ги провеждат. А самата интерпретацията и окончателните заключения като основна задача на специалистите в областта на геомеханиката, геологията, технологията на добива, хидрогеологията и инженерната геология, земната и скална механика и др. следва да се реализират съвместно с маркшайдерската служба.

ПРЕТЕНЦИИ ЗА ПРИНОСИ

Във връзка с реализирането на основните цели и свързаните с тях задачи, поставени в дисертационната работа, са постигнатите приложни и научно-приложни приноси:

1. На база обстоен анализ и сравнение на различни методи за изследване на деформационни процеси, включително и разходите за тяхната реализация е обосновано потвърден приложения за рудник “Асарел” подход.
2. Извършена е комплексна оценка и анализ на резултатите при използване на различни технологии - преки геодезически измервания и ГНСС наблюдения, с която е доказано предимството на първата и с цел усъвършенстване на методологията за анализ на деформационни процеси. Отчетена е високата плътност на информацията от радарната интерферометрия, честотата на обновяването и визуализацията ѝ при определяне на потенциално опасни зони и избор на местата на реперите.
3. Оценена и потвърдена е надеждността на първичната информация, по отношение неизменността на станциите, гарантирана с използване на ГНСС и е осигурена възможност за контрол чрез независими измервания на едни и същи репери.
4. Установено е влиянието на атмосферните условия и провеждането на взривни работи върху качеството на първичните данни, респективно върху параметрите на деформационния процес и са формулирани препоръки за подобряване на функционирането на системата.
5. Чрез използване на геоложко райониране и стабилизиране на репери в обособените типове скали е извършен статистически анализ на векторите на преместване, с което е разкрит характера на деформационния процес в отделните зони, наличие/отсъствие на корелационни зависимости и е оценена тяхната надеждност.

ПУБЛИКАЦИИ СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

1. Прокопов, Я. Методи и средства за изследване на деформационни процеси в открити рудници, Геодезия, картография, земеустройство, 2020, № 5-6, с. 33-40.
2. Прокопов, Я. Анализ на маркшайдерски наблюдения на реперна мрежа при реализация на мониторингова система в открит рудник за добив на медна руда, МАТТЕХ 2020, Шумен, Университетско издателство “Епископ Константин Преславски”, Сборник научни трудове, том 2, 2020, с. 236-246.
3. Прокопов, Я. Изследване на деформационни процеси в открити рудници, XXX юбилеен международен симпозиум “Съвременните технологии, образованието и професионалната практика в геодезията и свързаните с нея области”, 2020, 34.
4. Прокопов, Я., Топалов, Ст., Панчовски, Н., Бенова, Б. Резултати и анализ от практическата реализация на система за автоматизиран мониторинг, XVI международна конференция по открит и подводен добив на полезни изкопаеми, 6-10 септември 2021 г., Варна, България, под печат

SUMMARY

Topic: **Methodology for open pit slope and dump deformations analysis (on the example of Assarel-Medet open pit)**

Author: Yassen Trifonov Prokopov

Knowing the condition of the mine and the rock massif, as well as the ongoing processes in it allows making the right decisions regarding the management of its stability and ensuring reliable operation. Deviations from the design parameters and the influence of some technological processes can lead to a violation of the slope stability. An indication for such a process are registered spatial movements, which can be established quantitatively and assessed by geodetic observations of characteristic points in the problem areas. The development of deformation processes monitoring methods has led to the creation and application of automated technologies, providing both high precision and reliability of information and opportunities for processing, systematization, storage and interpretation. The installed developed system for automated monitoring and management of the Assarel - Medet open mine slope stability provides continuous spatial information about the slope condition and the spatial position of specially placed benchmarks.

The analysis of the primary data and the results of their processing gives grounds for specific conclusions given the impact of blasting, atmospheric conditions and seasonal changes, as well as the quality of instrumental measurements.

The methodology presented in the dissertation for automated monitoring of the stability of the slope and dump of open pit mines guarantees the objectivity of the results and allows for direct analysis and synthesis of the deformation processes.

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

2. Атанасов, А., Златанов, П., Стоянов, Д., Христов, С. Технология на откритото разработване на полезни изкопаеми, София, 2005.
15. Инструкция за изследване на деформациите на сгради и съоръжения чрез геодезически методи, София, Главно управление по геодезия, картография и кадастър, 1980.
17. Камбуров, А. Ръководство за учебна практика по опорни геодезически мрежи и ГНСС, МГУ „Св. Иван Рилски“, София, 2018.
20. Лазаров, А., Минчев, Д. "SAR Imaging Model", БСУ, Конференция, 2010.
22. Маждраков, М. Маркшайдерство. Методика на маркшайдерските работи в откритите рудници, Университетско издателство „Св. Климент Охридски“, София, 2007.
23. Маждраков, М., Бенов, Д., Вълканов, Н. Методът Монте Карло. Инженерни приложения, АСМО Academic Press, 2018.
30. Минчев, Д.П., Интерферометрични методи и алгоритми за моделиране и обработка на сателитни SAR изображения, Дисертация, БАН, ИСТ, София, 2012.
39. Стоева П., Златанов П., Александрова, Е. Устойчивост на откоси и отводняване в открити рудници и кариери, София, 2005.
43. Хофман-Веленхоф, Б., Н. Лихтенегер, Дж. Колинс. Глобална система за определяне на местоположение. Теория и практика., София, превод, 2002.
49. Христов, Ст. Устойчивост и отводняване на откосите в откритите рудници и кариери, ИК „Св.Ив.Рилски“, МГУ, София, 2000.
54. Янков, И. Геодезически методи за изследване деформации на инженерни съоръжения, Дисертация, УАСГ, София, 2009.
56. Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии, Москва, ФГУП „Картгеоцентр“, 2005.
57. Зарубин, В. С., Селиванов, В.В. Вариационные и численные методы механики сплошной среды. Москва, МГУ, 1993.
59. Лашков, Н. П. Разработка и исследование метода совместной разработки спутниковых и наземных измерений при создании геодезических сетей специального назначения, Дисертация, Москва, МИИГАиК, 2003.
62. Низаметдинов, Ф.К., С.Г. Ожигин, Р.Ф. Низаметдинов, С.Б. Ожигина, Н.Ф. Низаметдинов, Е.Н. Хмырова. Состояние и перспективы развития геомеханического обеспечения открытых горных работ., XV Internacional ISM Congress, 2013.
74. Bitelli, G., Dubbini, M., Zanutta, A. Terrestrial Laser Scanning and Digital Photogrammetry Techniques to Monitor Landslide Bodies, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 35, 2004.
81. Carlà, T., Tofani, V., Lombardi, L., Raspini, F., Bianchini, S., Bertolo, D., Thuegaz, P., Casagli, N. Combination of GNSS, satellite InSAR, and

- GBInSAR remote sensing monitoring to improve the understanding of a large landslide in high alpine environment, *Geomorphology* 335, 2019.
82. Chrzanowski, A. and Wilkins, R. Accuracy evaluation of geodetic monitoring of deformations in large open pit mines. 12th FIG Symposium on Deformation Measurements, Barden, 2006.
 93. Hanssen, R. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis, Remote Sensing and Digital Image Processing, Volume 2. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2001.
 96. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E. GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo & more, SpringerWienNewYork, 2008.
 106. Mayer, E., Rott, C., Henry, H. Mapping mining-induced subsidence from space in a hard rock mine, example of SAR interferometry application at Kiruna mine, *CIM Bull.*, vol. 97, no. 1083, 2004.
 110. Mustoe, G.G.W., Williams, J.R., Hocking, G. The discrete element method in geotechnical engineering, *Developments in soil mechanics and foundation engineering* 3, 1987.
 111. Narendranathan, S. and Nikraz, H. Optimal System Design for Instrumented Slope Monitoring in Open Pit Mines. In: *Proceedings of the International Conference on Advances in Geotechnical Engineering*, Australian Geomechanics Society, 2011.
 118. Prokos, A., Roumpos, Ch., Ground Deformation Monitoring Techniques at Continuous Surface Lignite Mines, 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Athens, Greece, 15-17 May 2019.
 124. Settles, E., Göttle, A. and Von Poschinger, A. Slope monitoring methods-a state of the art report. *ClimChalp Interreg III B Alpine Space. Work package 6*, 2008.
 127. Shien, Ng Kok, Reliability Analysis On The Stability Of Slope, Faculty of Civil Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 2005.
 128. Small, D., Barmettler, A., Egliq T. Differential SAR-Interferometry, 2008.
 130. Smolskiy, S.M., Komarov, I.V. Fundamentals of Short-Range FM Radar, Artech House: Boston, MA, USA, London, UK, 2003.