



МОНИТОРИНГ НА ДЕФОРМАЦИИТЕ В РУДНИК “АСАРЕЛ“ ЧРЕЗ РОБОТИЗИРАНИ ТОТАЛНИ СТАНЦИИ И ГЕОТЕХНИЧЕСКИ РАДАРИ

инж. Стояна Скачкова, e-mail: sskachkova@asarel.com
инж. Николай Панчовски, e-mail: nikolaipanchovski@asarel.com

ABSTRACT

The report presents the installed on the territory of Asarel mine automated monitoring systems for observation the relocations of the open pit slopes, the methods and the technology for measuring of the deformations, and the role of the monitoring of the deformations for reducing the risk of disturbing the stability of the mining slopes.

1. Увод

Минно-обогатителен комплекс „Асарел-Медет“АД е водеща българска минна компания за открит добив и обогатяване на медни и други руди. Намира се на 11 км северозападно от град Панагюрище и на 90 км източно от столицата София.

Скалите, изграждащи находището, са повсеместно и хидротермално променени, установени са 40 разломни структури, има обособени разтрошени зони. Плановете за развитие на рудник „Асарел“ са свързани с неговото нарастване в дълбочина, което изисква непрекъснат мониторинг на рудничните бордове (Фигура 1).



Фигура 1: Общ поглед на рудник “Асарел”

Имайки предвид сложните геотехнически и хидрогеоложки условия, се взема решение за изграждане на автоматизирана система за мониторинг на бордовете в рудника. Тя трябва да осигурява пълно покритие на територията на рудника. За да се осъществи взетото решение, се закупуват две геотехнически радарни системи и три роботизирани тотални станции. Те осъществяват непрекъснат, 24-часов мониторинг на рудник „Асарел“. При установяване на стойности над допустимостите, системите генерират аларми и уведомяват заинтересованите лица за незабавни мерки.

2. Система от роботизирани тотални станции за мониторинг

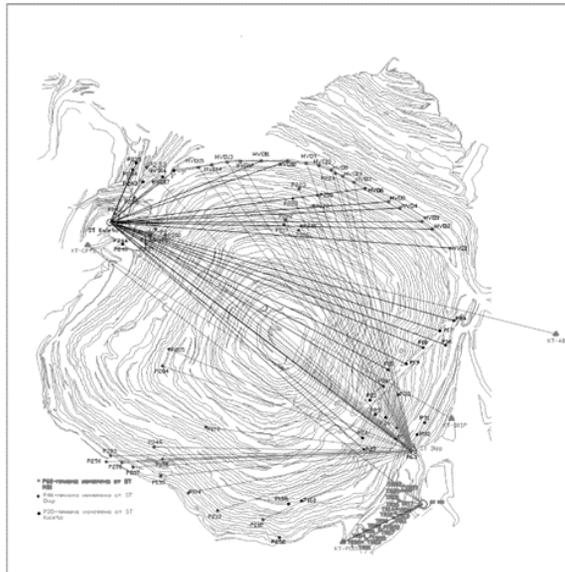
2.1 Обща характеристика на наблюдателната система

Следенето на деформации в рудник „Асарел“ се осъществява чрез три роботизирани тотални станции и мрежа от проектирани и изградени наблюдавани точки (отражателни призми), разположени в рудничния котлован (Фиг.2.1).



Системата включва:

- ST1, ST2, ST3,...STn, - Стълбове, на които се центрират геодезически инструменти, от които се измерва преместването на реперите P1,P2,...
- P1, P2, P3, ...Pn - наблюдавани точки - мониторингови репери, на които се определят хоризонталните и вертикални премествания.
- KT1, KT2, KT3, ... KTn - контролни точки за проверка на подвижността на станциите ST1, ST2 и т.н.



Фигура 2.1: Схема на всички мониторингови репери в котлована на рудник „Асарел”

2.2 Роботизирани тотални станции

Всички тотални станции са разположени на места извън зоните на водене на минни дейности. Те имат относително стабилно състояние. Въпреки това неподвижността им се контролира с прецизни и непрекъснати GNSS измервания. Снабдени са с автономно захранване. На всеки кръгъл час извършват измерване на всички заложи репери.

Първата тотална станция - ST MBI се намира на кота 918 (Фигура 2.2.1). Монтирана е върху специално изграден стълб за принудително центриране. Върху нея има позициониран GNSS приемник, който контролира първоначално определените координати на станцията. В лилав цвят на Фигура 2.1. са показани наблюдаваните репери от TC MBI.



Фигура 2.2.1: Тотална станция ST MBI



Втората тотална станция - ST Radar се намира на кота 915 (Фигура 2.2.2). Тя е аналогична на първата – монтирана е върху стълб за принудително центриране и е оборудвана с GNSS приемник, следящ за координатите на станцията в реално време. Наблюдаваните от нея репери са отбелязани в жълт цвят на Фигура 2.1.



Фигура 2.2.2: Тотална станция ST Radar

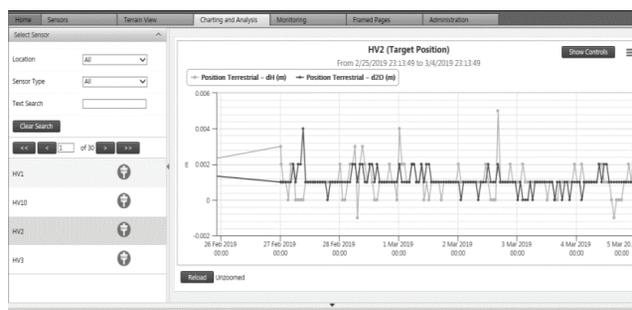
Третата тотална станция е монтирана на кота 906 (TS Dispesherna) в кабина и няма оборудване с GNSS приемник. Точните ѝ координати се определят посредством измервания към контролни точки, разположени извън деформационните зони. Наблюдаваните репери са дадени в зелен цвят на Фиг.2.1.

2.3 Репери за наблюдение

Всички репери са трайно стабилизирани и сигнализирани с призми. Те се намират на места в разломни зони, силнооводнени зони, берми с пукнатини вследствие на добива. Има разположени призми по всички хидроложки и инженер-геоложки сондажи с цел следенето на деформациите в техните зони. Следене на деформации се извършва и по главния водоснабдителен тръбопровод, както и хвостопровода на територията на рудник „Асарел“ (Фигура 2.1).

2.4 Софтуер за обработка на измерванията

За управлението на системата за мониторинг, обработката и анализа на резултатите от измерванията в реално време се използва специализиран софтуер, представляващ мощна, съвременна софтуерна платформа за автоматизиран мониторинг, базирана на изключително прецизни геодезически измервания в реално време. Това позволява съвместна обработка и интерпретация на данни, получени от няколко различни вида инструменти, автоматизирани тотални станции, GPS/GNSS приемници. Могат да се изготвят таблични и графични справки за поведението на даден репер или цяла зона, за определен период от време (Фигура 2.4.1).



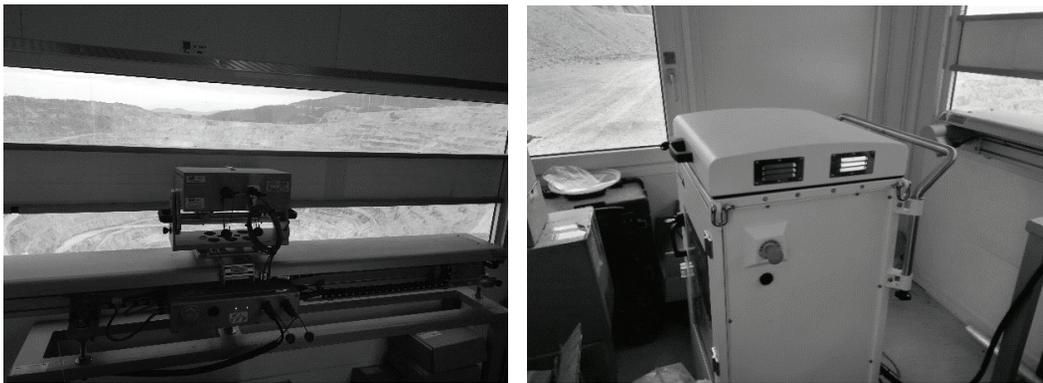
Фигура 2.4.1: Визуализация на мониторингов репер



3. Наземни радарни системи

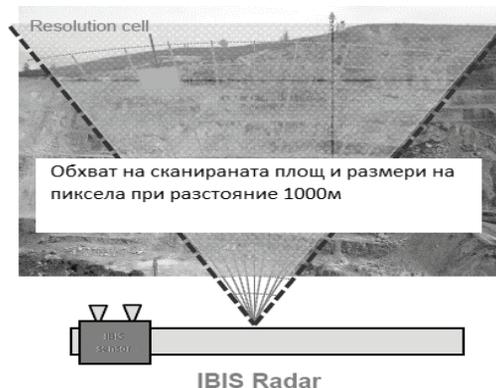
3.1 Обща характеристика на радарните системи

Местоположението на радарната система се избира прецизно, в зони далеч от водене на минни дейности. За целта се избира място за позициониране, на което не се придвиждат минни дейности в срок около три години. Радарната система е изградена на модулен принцип – радарен модул, захранващ модул, метеорологична станция, модул за управление и съхранение на суровите данни, модул за обработка на радарните данни и генериране на алармени съобщения. Основните модули са визуализирани на фигурите по-долу (Фиг. 3.1.1).



Фигура 3.1.1: Линеен скенер и радарна глава

Георадарът предоставя пространствена резолюция на рудничните бордове с размери - 0.75 x 4.5 m (< 3.5 m²) на 1000 m разстояние. Максималният обхват за следене на деформации е до 4000 метра (Фиг. 3.1.2).



Фигура 3.1.2: Обхват на сканираната площ и размера на един пиксел

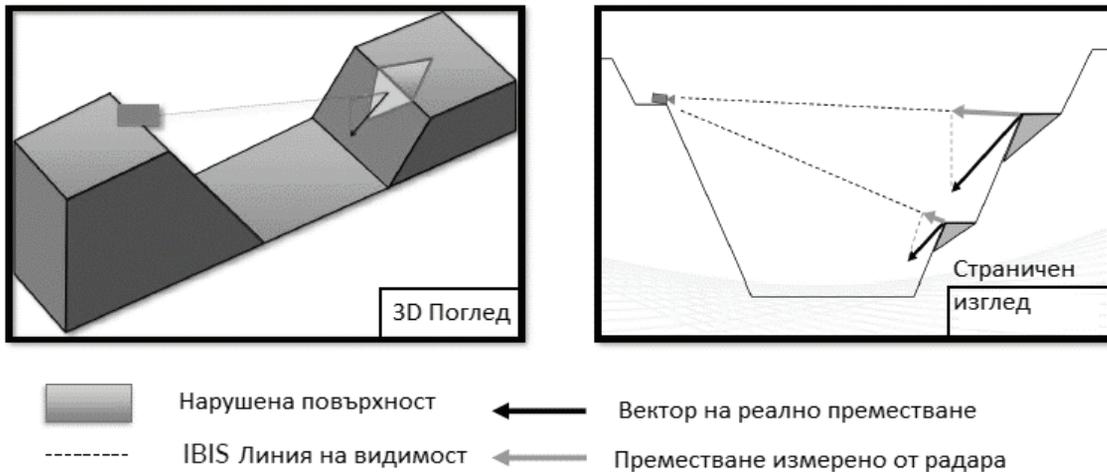
3.2 Принцип на действие на радарните системи

Радарният сензор се движи по линеен скенер и излъчва електромагнитни вълни с честота 17.130 GHz към повърхността на рудничните стъпала. В рудник „Асарел” георадарът сканира на всеки 10 мин. При този интервал на сканиране, максималната скорост на движение на масива, която може да засече радарът е 26.3 мм/ч. За едно сканиране радарната глава излъчва 400 пъти електромагнитна вълна и приема отразения сигнал от повърхността на масива. За интерферометричната преработка се използват разликите в нивото на сигналите, излъчени от радара и тези, отразени от земната



повърхност. За всяка снимка се генерира цифров височинен модел на терена – DEM (Digital elevation model), от който може да се определи деформацията, възникнала на земната повърхност.

Движенията, които са перпендикулярни на радараната линия на видимост, показват нулево преместване (Фигура 3.2.1).



Фигура 3.2.1: Радарна линия на видимост

Радарът има опция за автоматична атмосферна корекция. По този начин се осигурява точна и надеждна информация, която представлява напълно достоверен цифров модел на терена.

3.3 Практическо предназначение на радарните системи

Практиката показва, че има много прилики в документираното и наблюдаваното времево поведение на бордовете в откритите рудници. Времевата реакция при отработване е функция на якостните свойства на скалната маса, структурната геология, геометрията на борда, скоростта на изкопните работи, механизма на деформациите и въздействието на странични сили, като например: влияние на подземните води, сеизмично въздействие и напреженията в масива. Скалните бордове във времето преминават през четири отделни фази на деформационно поведение, а именно:

- Фаза I – Първоначална реакция;
- Фаза II – Регресионно поведение (кратковременни забавяния в деформационния процес);
- Фаза III – Преходен етап на регресивно/прогресивно поведение;
- Фаза IV – Прогресивно поведение (намаляване на напрежението в масива и мащабна деформация, водеща до окончателен колапс).

Основните характеристики на тези четири фази са описани по-долу.

Първоначална реакция

В резултат на еластичните си свойства, всички скални откоси преминават през периода на първоначална реакция, когато - поради промени в напреженията, предизвикани от изкопните дейности - се предизвиква свиване и/или разширяване на скалната маса. Тези първоначални деформации се очаква да се появят без развитието на определен деформационен механизъм или хлъзгателна повърхнина. Деформациите в откоса през тази фаза се развиват по определени системи пукнатини или други структурни нарушения с ниска якост.

Martin (1993) отбелязва, че по време на първоначалната реакция, скоростите на движение варират от 0.1 до 4.0mm/ден (0.01-0.02mm/h). Когато рудникът се развива в период от 20 – 30 години (каквото е в случая рудник „Асарел“), през началната фаза може да се очакват общи деформации от



над 300mm – 500mm през този период. Тези стойности на деформациите, в повечето от наблюдаваните случаи, не оказват съществено влияние върху якостните свойства на скалата или стабилитета на борда до момента на появата на прогресивните деформации, които могат да завършат със свличане.

Обикновено скоростите и общите деформации по време на първоначалната фаза са свързани с якостта на скалната маса, като скалите с по-високи якостни показатели проявяват по-ниски начални скорости и по-ниски стойности на общите деформации. За условията на рудник „Асарел“ може да се добави, че съществува значителна разлика в деформациите по бордовете между западната и източната част на котлована, където са представени съответно скали с аргилизитна и пропилитна метасоматична промяна.



Фигура 3.3.1: Типично регресивно/прогресивно поведение на деформационните криви във функция от времето, (Zavodni u Broadbent 1982)

Регресивна фаза на деформациите

Регресивна фаза на една деформация е тази, при която се регистрират краткосрочни забавящи цикли на преместване, когато причината за деформацията бъде отстранена. Обичайното състояние на деформациите от тази фаза са предизвикани от структурни нарушения. Съществуват множество примери за деформации в регресивна фаза и техните деформационни характеристики, които могат да бъдат представени с крива А на Фиг. 1. Точките 1, 2 и 3 от тази крива представляват линейната стойност на деформацията във функция на времето. Характеристиката, която квалифицира тази крива като регресивна, е забавяне на регистрираните деформации във всеки цикъл между точки 1, 2 и 3.

Broadbent и Ко (1971) показват, че всеки деформационен цикъл (например от 2 до 3) е предвидим в относително еднаква среда и по принцип точките (1, 2, 3) описват ускорението. Скоростта на деформациите ще затихне, ако се премахне външното влияние, което обикновено е свързано с външни събития като взривни дейности, земетресения, валежи, температурни промени, промяна в налягането на подземните води или промяна на скалите в масива.

Устойчивостта на много откоси в регресивен режим може да бъде контролирана, ако се допусне малка деформация преди спирането на минните дейности и се остави откосът да релаксира. Това е практика, която се прилага при управление на възникнали деформации. Ако минните дейности продължат, докато откосът е с висока скорост на деформация, връщането му в равновесно положение обикновено отнема по-дълго време. Ако бордът се отработва твърде дълго при високи скорости на деформациите или ако се промени хидроложката ситуация, деформациите може да преминат в прогресивен режим и да се стигне до свличане.

При отработване на борда в регресивна фаза, по-честите изтегляния на техниката с кратки периоди на добив и кратки прекъсвания могат да бъдат за предпочитане пред дълги периоди на добив



с по-кратки изтегляния на техниката и удължени времеви закъснения (Savely 1993). Опитът показва, че приемливите скорости на деформации за безопасен добив варират в широки граници от 0 до 90cm/24h (0 – 3.75mm/h), в зависимост от деформационните характеристики на скалите. Call и Nicholas (1998) предлагат, че за предвидими деформации с регресивен характер, безопасни минни дейности могат да се водят до около 40mm/24h (1.75mm/h).

Регресивно/прогресивна фаза на деформациите

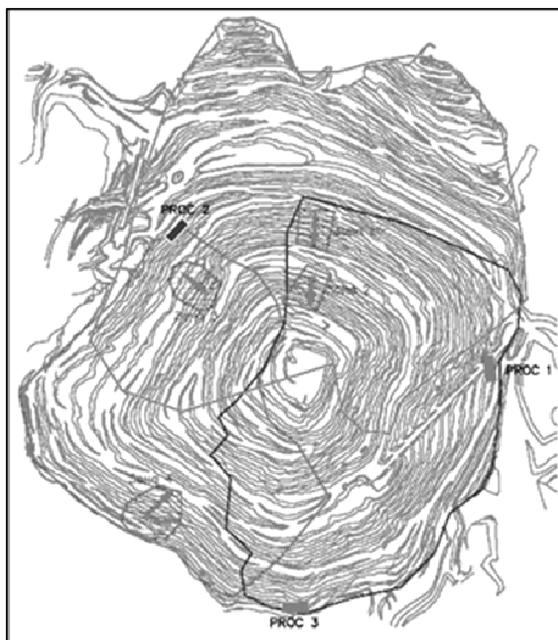
По време на развитието на регресивната фаза, съществува междинен етап, през който могат да се вземат подходящи мерки, с които да се стабилизира регресивният характер на деформацията или - в противен случай, регресивният характер да се трансформира в прогресивен такъв. Налице са много данни, които подкрепят твърдението, че много, ако не и най-значимите от икономическа гледна точка деформации, започват да действат като регресивни и поради наличието на други фактори или предприети неадекватни мерки – преминават в прогресивни. Тази ситуация е описана от кривата С на Фигура 1. Деформациите в преходно състояние са значителни, тъй като структурните условия през регресивната фаза, често се контролират от много нестабилното състояние в началото на прогресивната фаза. Всъщност, преходното състояние (крива С) изисква интензивен дизайн, мониторинг, контрол и реконструкция на откоса.

Calder и Blackwell (1980), дискутират този тип деформации като характерни за слаби скали със структурни нарушения. Тези видове деформации имат много разнообразни характеристики. Така наречените широкомащабни, дълбоко залягащи деформации (Martin 1993), обикновено са бавно развиващи се, като рядко завършват с катастрофални събития. Движението обикновено включва ускорение, последвано от забавяне в отговор на извършване на минни дейности или колебание в поровото налягане в масива. Скоростите на движение достигат приблизително 90mm/24h (3.75mm/h), като катастрофалното свличане е било достигнато при обща деформация от над 9m. За рудник „Асарел“ може да се каже, че характерните за находището аргилизити имат високи пластични свойства. В северозападната част на рудника през 2019 г., деформацията достигна почти 11m без да се стигне до катастрофалното свличане на борда. Това се дължи на високите пластични свойства на аргилизитите, които изграждат района на деформацията.

Savely (1993) отбелязва, че откос, който продължава да пълзи с постоянна скорост с постепенно увеличаване на деформациите с течение на времето, се смята за "стабилен режим". Стабилното поведение на откоса може да се промени в прогресивния етап, след като е претърпял значително движение поради намаляването на срязващата сила с течение на времето.

Прогресивна фаза на деформациите

Скорост на преместване над 5cm/24h (2.09mm/h) обикновено показва, че деформацията е в прогресивен етап и че пълно свличане може да настъпи в рамките на от 0 до 58 дни ако не се вземат допълнителни мерки като например, прекратяване на добивните дейности ако има такива или мерки, целящи намаляване на поровото налягане в района. Когато скоростта надвиши около 10cm/24h (4.2mm/h), районът за минните работи трябва да се евакуира. Точката на пълното свличане може да се появява в период между 4 и 45 дни след завършване на първоначалната фаза. Точката на началото на свличането е практически невъзможно да бъде определена предварително, докато деформацията е все още в регресивен етап. Това по всяка вероятност е функция на "умора на откоса", който е свързан с броя и размера на външните свличащи импулси, разтрошаването на плъзгащата се скална маса с придружаващата намаляваща якост, възможни изменения на напреженията, които се развиват в опъновни пукнатини около горния ръб на откоса и внезапно нарастване на поровото налягане.



Фигура 3.3.2: Местоположение на радарните системи, наблюдаваните от тях райони на рудника и деформационните зони в него.

В момента рудника разполага с 3 радарни системи, които покриват цялата повърхност на котлована. Местоположението на тези системи и районите, които покриват с наблюдение, могат да се видят на Фигура 2. На тази фигура са обозначени и деформационните зони, които са били активни през различни периоди от експлоатацията на рудника, показващи посоката на техните деформации. От фигурата може да се види, че Зона 1 и Зона 2 се наблюдават от Процесор 2 и Процесор 3, Зона 3 се наблюдава от Процесор 1 и Процесор 3 и Зона 4 се наблюдава само от Процесор 1. Както при всички мониторингови системи, така и при радарите, достоверността на отчетите е обратно пропорционална на разстоянието до наблюдавания обект.

4. Заключение

Изградената автоматизирана мониторингова система за следене на деформациите на бордовете на рудник „Асарел” покрива 100% от площта на рудника. Тя успешно изпълнява своите функции. Чрез нея всички установени отклонения се сигнализират в най-ранен стадий, взимат се бързи и адекватни действия. Това осигурява безопасната и ефективна работа на рудника.

5. Библиография

1. Call, R.D. and Nicholas. 1998. Monitoring and slope management. Internal Memorandum, April 1998.
2. Kennedy, B.A., and K.E. Niermeyer. 1970. Slope monitoring systems used in the prediction of major slope failure at the Chuquicamata Mine, Chile. *Proceedings of Symposium on Planning Open Pit Mines*, Johannesburg. Amsterdam:A.A. Balkema.
3. Martin, T.M. 1993. Application of rock mass monitoring for stability assessment of pit slope failure. *Proceedings of 33rd U.S. Rock Mechanics Symposium*, pp. 221-229.
4. Доклад: Наблюдаване на критичните разломни зони - Асарел-Медет.