

## ГЕОТЕХНИЧЕСКИ АНАЛИЗ НА СТРУКТУРНАТА ЦЯЛОСТ И НАКЛОНА НА ОТКОСИТЕ НА РУДНИЧНИТЕ СЪПАЛА В ОТКРИТ РУДНИК „ЕЛАЦИТЕ“, БЪЛГАРИЯ

Stefan Nachev, Ivan Vasilev

Ellatzite-Med AD, 2086 Mirkovo, E-mail: s.p.nachev@ellatzite-med.com, i.vasilev@ellatzite-med.com  
Corresponding author: s.p.nachev@ellatzite-med.com

### ABSTRACT

The article deals applies geotechnical investigation of the structural integrity of the Ellatzite open-pit mine and considers the achieved bench face angle, while looking at the final geometry shaping of the bench face. The study shows that the influence of the lithology, rock mass structure, mining technology and water saturation of the bench faces is of crucial importance in achieving the long-term sustainability of the mine benches. Therefore, some necessary efforts must be made to optimize the technological processes in the mine, as well as to drainage rain precipitation and groundwater away from the slopes, by maintaining an effective and appropriate drainage and dewatering system.

**Key words:** open pit mine, geotechnical investigation.

### Въведение

Рудник „Елаците“ се експлоатира от „Елаците-Мед“ АД, част от групата фирми Геотехмин. Основната му дейност е добив на медно-порфирни златосъдържащи руди от находище „Елаците“, намиращо се в Етрополска Стара планина, над град Етрополе, на около 100 км източно от гр. София.



Фиг. 1. Местоположение на рудник Елаците (Google Maps 2020).

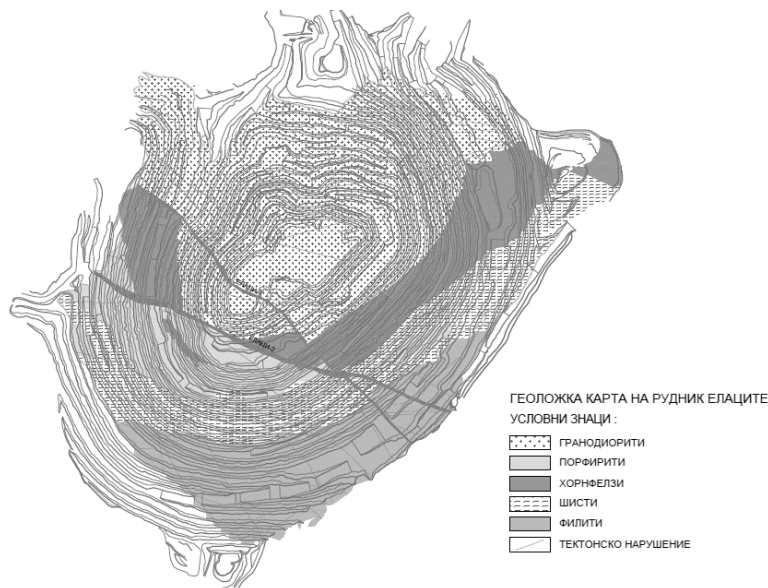
Устойчивостта и геометрията на рудничните откоси се контролира от геолого-структурния строеж, факторите свързани с проекта на рудничните съпала и технологията на добив. В настоящата публикация ще се спрем основно на геотехническата оценката на постигнатите ъгли на откоса като функция от геометрията и устойчивостта на рудничните съпала.

Влиянието на различните фактори е специфично за различните сектори на открития рудник. Това е необходимо да се отчита при изготвянето на оценките за състоянието на откосите. Най-стръмните ъгли на единичните и сдвоени съпала, които гарантират безопасно изкопаване и отработване на минната маса, се постигат чрез запазване на якостта и структурната цялост на рудничните откоси, минимизиране на технологичните пукнатини в масива и постигането на проектната геометрия на рудничното съпало.

Намаляването на якостта в скалния откос произтича от механиката на взривните работи, чрез получените при тях вибрации и от работата на разширяващите се газове. Прекомерното нарушаване на целостта на масива, води до намалена устойчивост на откоса на рудничното съпало и обрушаването на минна маса, които са често срещани в откритите рудници (Ноек, 2007).

Прекомерното разрушаване на откоса може да се опише като разпространението на въздействието на взривните работи извън предвидената зона на взривяване или разпространението на техногенни пукнатини в скалния масив зад отбивната линия. В рамките на взривното поле може да се очаква около 80% намаляване на якостта на скалния масив (Peterson, 2001). Това намаляване на якостта може да се разпространи и извън зоната на взривното поле по контакти, разломи и пукнатини (Krolkowski, 2015). Чрез намаляване на якостта на срязване на пукнатините се благоприятства придвижването и разместването по тях, което води до възможността да се създадат равнини на плъзгане и клиновидни свличания в скалната маса (Krolkowski, 2015).

Наличието на подземни води и увеличеното порово налягане в порите и пукнатините на скалния масив в зоната на взривните работи увеличава и мултиплицира ефекта от взривните дейности, което води до допълнителни деформации в откосите на рудничните стъпала.



**Фиг. 2. Геоложка карта на рудник „Елаците“ към март 2024 г., изготвена на базата на блоковия геоложки модел, поддържан от специалистите на рудник Елаците.**

Районът на открития рудник е изграден основно от три вида скали:

- палеозойски метаморфен комплекс (филити, шисти и хорнфелзи);
- палеозойски гранодиорити и съпътстващата ги жилна фаза от дайкови скали;
- горнокредни гранодиоритови, диоритови и кварцмонцодиоритови порфирити, процепващи горните два комплекса.

**Палеозойски метаморфен комплекс:** Скалите, изграждащи комплекса (хорнфелзи, шисти и филити), заемат средните и високите нива в южните, източните и югозападните части на рудничния котлован (Фиг.2).

- **Хорнфелзите (HFS)** се разполагат със слабо и крехко реактивиран интрузивен контакт над гранодиоритите на Веженски плутон. Във високите западни и средни югоизточни нива на рудника се разкриват структурно под монцодиоритовите порфирити (MDP) с граница, затъваща полегато на югозапад, която е интерпретирана като интрузивна.

- **Шисти (SCH)** – С отдалечаване от контакта над гранодиоритите, интензитета на контактната промяна плавно намалява и хорнфелзите (HFS) прехождат в шисти (SCH). Границата между HFS и SCH се простира по различни тектонски структури, като на някои места е поставена условно, тъй като е запазен преходен интервал между хорнфелзи и шисти. Преходният фациес е приобшен към разреза на хорнфелзите. Във високите хоризонти от източния борд на котлована се разкриват ниските структурни нива от разреза на SCH, които са разположени високо в съвременния релеф и навлизат в



изветрителната зона близо до естествения релеф. В тази зона шистите са умерено изветрели, с изветрителни окисни кори по почти всички пукнатини и нарушения, но са слабо засегнати обемно от изветрянето.

- **Филитите (РНУ)** изграждат най-високите части на зеленошистните метаседиментни скали на палеозойския метаморфен фундамент, които са останали незасегнати от контактните промени, свързани с внедряването на Веженския плутон. Крайните източни части на разреза попадат непосредствено под естествения релеф и съответно в изветрителната зона на масива. За тези части са характерни окислителни лимонитни кори.

**Веженски плутон:** Скалните разновидности, изграждащи плутона (гранодиорити (GRD), мафични тела и дайки и палеозойски гранодиоритови порфири) заемат централните (дълбоки) и северните части на рудничния котлован. Дайковите тела са редки и представляват силно подчинена част от обема на Веженския плутон. Контактът на GRD с вместиците го хорнфелзи е магматичен, частично реактивиран по разлом Приконтактен (**Фиг. 2.**).

**Горнокредните магмени скали** са представени от дайкови тела от порфири (**Фиг.2.**).

- Сред шистите от метаморфната рамка на Веженския плутон на високите хоризонти от източния сектор са установени тела от монцодиоритов порфирит (MDP), който е порфирен по плагиоклаза, макар и фенокритите да са силно глинясали. Освен силното изветряне, порфиритите са засегнати от серицитизация.

- В средните североизточни части на рудника се пресичат една от по-големите дайки от гранодиоритов порфирит (GDP) сред скалите на Веженския плутон. Тя има характерния облик за тези скали – дребно до средно порфирна по AMP, PLA и QTZ с основна маса от ксеноморфен дребнозърнест розово-червеникав KFS. Наложените промени са с незначителен интензитет, като се предполага наличието на слаба калиево-силикатна (POT) промяна.

- Голямото монцодиоритово тяло се разкрива в южните и югозападните части на рудника, което по състав не се различава от класическия MDP.

### Методика

При геотехническата оценка на откосите на рудничните стъпала се анализира степента на запазеност на структурната цялост на рудничните откоси и постигането на проектната геометрия на рудничното стъпало. Геотехническото картиране и характеристиката на получените деформации се извършва от Геотехнически отдел на рудник „Елаците“, чрез използване на утвърдените методики на Sebrían (2017), Marshall-Mohr (2005), Rock-mass ratings system (RMR – Bieniawski (1989) и ISRM (1981), modified 6/98), Mining Rock-mass ratings system (MRMR – Laubscher (1990)) и Q-slope (Bar & Barton, 2018) и др. Документацията и анализа на данните от картировъчните дейности се основават и на методиката, прилагана от екипите на НИС на СУ „Св. Климент Охридски“ при по-ранните изследвания (Георгиев и др., 2016-2023).

При детайлното изучаване на откоса на рудничните стъпала, от първостепенна важност е придобиването на следната информация:

- литоложки, структурни и текстурни особености на скалите и характер на наложените хидротермални изменения;
- взаимоотношения между различни литоложки тела и детайлна характеристика на първо- и второразредни разломни нарушения;
- детайлна характеристика на всички останали крехки нарушения, включваща подробното изучаване на групите пукнатини, отговарящо на изискванията на класификационните схеми на Bieniawski (BRMR) и Laubscher (MRMR);
- наблюдения и измервания на пластичните деформационни структури в откосите с метаморфни скали;
- оценка на водонасищането на масива;

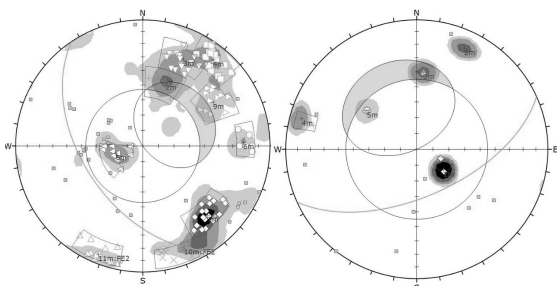
- обобщаващ кинематичен анализ на потенциалните възможности за възникването на нови гравитационни деформации и изясняване на механизма на образуването им (Георгиев, Н. и др. 2023);
- пространствен анализ на постигнатите ъгли на откосите на рудничните стъпала и изясняване на причините за образуване на понижени ъгли на откоса;
- оценка на въздействието на технологичните процеси в рудника върху откосите на рудничните стъпала (Nachev, St. et al. 2020);
- набелязване на мерки и дейности за постигане на дълговременна устойчивост и ограничаване на деформациите в рудничните стъпала.

### Резултати

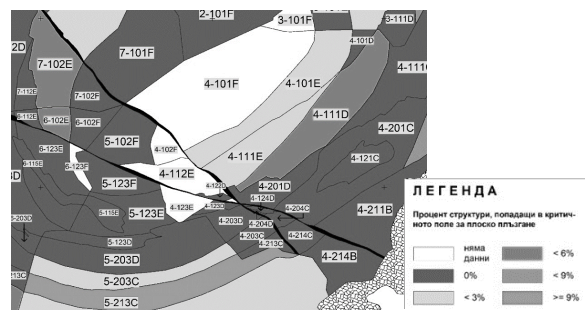
Кинематичен анализ за потенциалната кинематична стабилност на масива е изготвен във вид на структурни стереодиаграми със софтуерния продукт Dips, версия 7 на компанията Rocscience. Те изобразяват изготвената стереодиаграма с построено критично поле за конкретен вид деформация на база броя на нарушенията в съответния интервал; видът на направения кинематичен анализ; параметрите на откоса, използвани за построяване на диаграмата (ъгъл на откоса, страна на затъване на откоса и ъгъла на вътрешно триене), процентът вероятност за проявление на такъв вид деформации; допълнителни параметри на плътностна диаграма и на самата стереографска проекция. За изготвянето на диаграмите е използвана комбинация от всички разломи, големи пукнатини със следи от придвижване и групи пукнатини по интервали и сектори. В легендата към стереодиаграмата, която обозначава типовете структури, има оставени/обозначени съкращения на главните, второстепенните и част от треторазредните разломи. В резултат от анализите се изготвят карти на потенциалния риск от възникване на деформации (Георгиев, Н. и др. 2023).

Обобщаващ кинематичен анализ се извършва по 3 критерия: ориентировка на рудничните стъпала, лито-тектонски домейн и проектната позиция на геотехнически рампи. Анализът е извършен чрез обработка и интерпретация на данните получени при картировъчни дейности в рамките на рудничния котлован. Картите на потенциалния кинематичен риск позволяват да се добие обща представа за разпределението и относителната големина на риска от възникване на различни гравитационни деформационни процеси (Фиг. 4. и Фиг. 6).

**Плоско плъзгане** – Тази процес е с различен потенциален риск за възникване в почти целия котлован. За плоско плъзгане не се наблюдава литоложко предпочитание, а се установява предимно неравномерно разпределение. Най-високи концентрации на рискови структури, подходящи за проява на тази деформация се наблюдават както сред магмените скали (GRD и MDP) в средните западни и южни нива, така и в метаморфити (HFS и SCH) от средните южни и високи източни нива. (Фиг. 3. и Фиг. 4.).



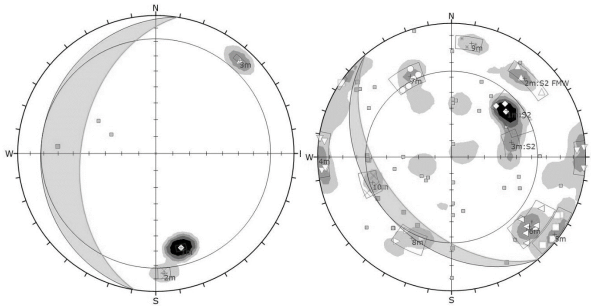
Фиг. 3. Стерографски симулации в горна полусфера на потенциалния риск от плоско плъзгане (Георгиев, Н. и др. 2023).



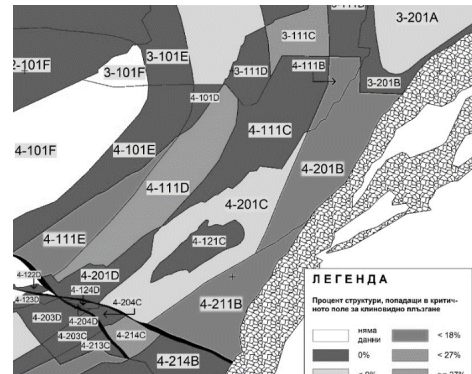
Фиг. 4. Карта на потенциалния риск от възникване на плоско плъзгане по кинематични сектори (Георгиев, Н. и др. 2023).

**Клиновидно плъзгане** – Установява се неравномерно разпределение и слаб израз на литоложки фактор, с изключение на по-голямата част от секторите, в които се разкриват шисти с нисък и рядко

умерен риск за възникване. Прави впечатление, че повечето сектори с умерен до повишен риск от 4% до 22%, са такива, граничещи с първоразредни разломи Елаци-1 и Елаци-2 (Фиг. 5 и Фиг. 6).



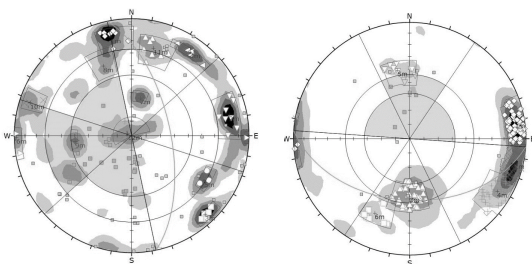
Фиг. 5. Стереографски симулации в горна полусфера на потенциалния риск от клиновидно плъзгане (Георгиев, Н. и др. 2023).



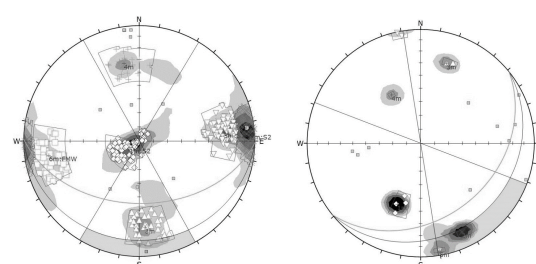
Фиг. 6. Карта на потенциалния риск от възникване на клиновидно плъзгане по кинематични сектори (Георгиев, Н. и др. 2023).

**Блоково прекатурване** – Това е процеса с най-голяма вероятност за възникване. При него се наблюдава голяма вариация в потенциалния риск за проявата в почти всеки отделен сектор. Това може да се обясни с добре развитата мрежа от крехки структури (по-често и добре развита при блоково напуканите скали, основно магмени GRD, MDP и по-рядко HFS) с различни рангове в рамките на рудника. Най-ясно очертаната част от котлована е североизточната, където имаме най-голяма гъстота и процента вероятност на структури подходящи за възникване на блоково прекатурване, там попада и един от най-критичните сектори в рудника. В юг-югоизточните части също се очертават две критични зони в шисти, при които основна роля играят комбинациите от елашки, субмеридионални, пристанищенски и екваториални структури, пресичащи повърхности (най-често групи пукнатини) стръмно затъващи към север или юг. (Фиг. 7).

**Флексурно прекатурване** – Този процес е характерен за скали с добре изразена слоесто-ивичеста текстура. Това е ясно очертано в рамка обхващаща почти всички метаморфити (с изключение на HFS) от високи източни през междинни и високи южни до високи югозападни нива. Скалите, попадащи в тези очертания са контактни шисти и филити, при които се наблюдава добре изразен максимум на риска за възникване на флексурно прекатурване. Това се дължи на метаморфната S2 фолиация и структури развити по нея, стръмно затъващи противоположно на страната на затъване за съответния участък. С по-висок потенциален риск за възникване се очертава сектор попадащ между главните разломи Елаци-1 и Елаци-2 (Фиг. 8).



Фиг. 7. Стереографски симулации в горна полусфера на потенциалния риск от блоково прекатурване (Георгиев, Н. и др. 2023).

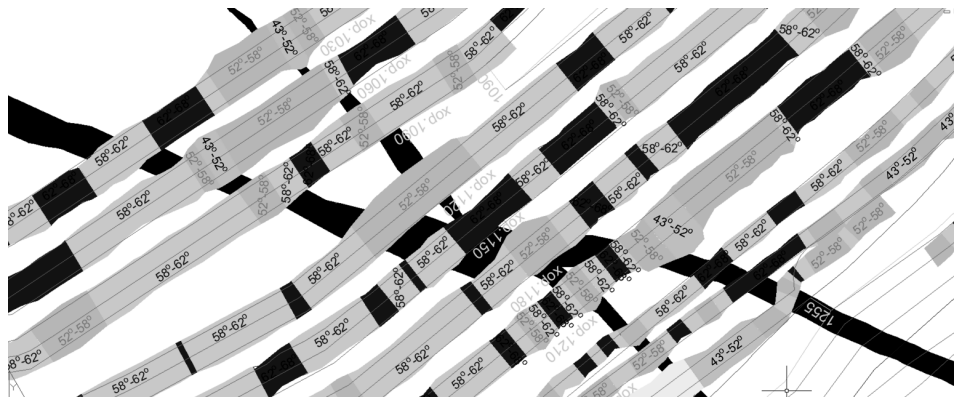


Фиг. 8. Стереографска симулация в горна полусфера на потенциалния риск от флексурно прекатурване (Георгиев, Н. и др. 2023).

От анализа на кинематичните сектори се вижда, че във всички участъци на котлована съществува опасност от изява на различни по вид гравитационни деформации. Те са свързани основно с мрежата

крехки нарушения сред магмените скали, от които главна роля играят групите пукнатини. При слабо контактно променените и непроменени метаморфити този строеж се съчетава с прекъснатостите по фолиационните S2 плоскости, които придобиват водеща роля за високия кинематичен риск в скалния масив.

Пространственият анализ за постигнатите ъгли на откоса е изготвен върху план на рудника с проектните ръбове на долния и горният ръб на рудничните стъпала и постигнатите ъгли на откоса на рудничното стъпало във вид на интервали от стойности със софтуерния продукт AutoCAD, версия 2022 на компанията Autodesk. Анализът е извършен в зоните, в които е достигнат краен проектен контур за съответния хоризонт. В зоните на наклонени пътища и в работните зони не са анализирани ъглите на откосите, поради техния временен характер. (Фиг. 9).



Фиг. 9. Карта на интервалите на постигнатите ъгли на откосите и проектните горен и долен ръб. С черен цвят са показани разломите Елаци-1 и Елаци-2. Те се пресичат в тази зона на рудника.

За обобщения интервален анализ на постигнатите ъгли на откоса на рудничните стъпала са обединени в три интервала за сдвоените 30 m стъпала – под 58° (циан или светлосин цвят), от 58° до 62° (тъмно син цвят) и над 62° (зелен цвят). Проектният ъгъл на откоса на сдвоените стъпала е 65° и попада в последния зелен интервал (Фиг. 10).



Фиг. 10. Карта на интервалите на постигнатите ъгли на откосите, литологията и основните тектонски структури.



Подобно на обобщения кинетичен анализ и при пространствения анализ на постигнатите ъгли на откосите на рудничните стъпала не се наблюдава зависимост от литоложкия състав на скалите. Постигането на проектните ъгли на откоса е съсредоточено в ниските и средните нива на западната и южната част на рудничния котлован поради благоприятно разположение на разломите и пукнатините спрямо ориентацията на горния и долния ръб на рудничните стъпала (**Фиг. 11.**).

Във високите нива на западния борд на рудника, изграден от хорфелзи и порфирити, имаме под  $58^\circ$  ъгъл на откоса поради напукаността на масива, изветрянето на скалите и притока на инфилтрирани подземни води от разположеното в близост Западно насипище. Понижени ъгли на откосите се наблюдават в натрошените тектонски зони, формирани от пресичането на два и повече разлома или в зоните с повишена напуканост и формирането на блокове с малки размери (**Фиг. 12.**).



**Фиг. 11.** Западната и южната част от рудничния котлован е постигнат проектен ъгъл от  $65^\circ$ .



**Фиг. 12.** Тектонски зони с понижени стойности на ъгъла на откоса на рудничните стъпала (под  $58^\circ$ ).

Хидроложките особености на картираните участъци като влажност и водоприток с различен дебит са повлияни пряко от сезонните дъждове, местоположение на тяхното проявление, ориентировка спрямо откоса на структурата, по която се дренират, както и котата на изследвания хоризонт.

В по-дълбоките нива от рудника се наблюдават различни по влажност и водоприток зони. Отбелязани са и единични случаи на дрениращи структури със слаб капещ водоприток. В североизточните и източните части на котлована, в средните нива, се наблюдават множество намокрени и овлажнени участъци в откосите както в гранодиоритите, така и в метаморфния разрез. Поради това през юли и август 2023 г. в тази зона бяха прокарани 4 хоризонтални дренажни сондажа на хоризонт 1060, които осушават масива със среден общ дебит  $2=4$  l/s.

Обобщените резултати от геотехническия анализ на откосите на рудничните стъпала след провеждане на контролирани взривни дейности са илюстрирани с 12 примера на различна геометрия на получения откос. Разликата в геометрията между проектния и получения откос на рудничното стъпало след изземването на взривената минна маса се дължи на комбинацията между якостните характеристики на скалите, напукаността на скалния масив и технологията на взривяване (Nachev, St. et al. 2020).

Начинът, по който се извършват взривните работи и особено последното взривяване на стъпалото, при което се оформя неговата окончателна конфигурация, респективно и ъгъла на откоса, може да бъде критичен за осигуряването на крайната устойчивост на рудничния борд. Правилното прилагане на техниката на контролираното взривяване позволява да се сведе до минимум взривоσειзмитното влияние върху откосите и точното оконтуряване на горния и долния ръб на стъпалото. С негова помощ се постига оптимизация на ъглите на откосите и се осигурява максимална широчина на крайната берма (Nachev, St. et al. 2020).

### Заклучение

Разломите оказват деструктивно влияние на скалния масив около тях, като скалите намиращи се във висящото крило на разлома са значително по-нарушени. Именно това води до образуването във висящото крило на разлома на повърхнини с прекомерно разрушаване по цялата повърхнина на откоса.

Характерна особеност за монцоидиоритовия порфирит е развитието в него на клиновидни свличания в случаите, когато върхът на пирамидата, оформена от призматичното напукване, е насочена към въздушната част на откоса на рудничното стъпало. В хорнфелзите също честото се формират клиновидни свличания с различни размери. Понякога те обхващат повърхността на откоса от горен ръб до долен ръб. Рядко сред гранодиоритите се срещат клиновидни обрушвания.

Прави впечатление, че в участъците с по-интензивна контактна промяна, в близост до магмените скали, се формират големи клиновидни свличания и повърхнини на хлъзгане. Това се дължи на загубата на пластичните свойства на тези метаморфни скали и формирането в тях на издържани пукнатинни групи.

Използването на контурен ред сондажи с предварително взривяване, намалява нарушенията по откоса зад него, като контролира специфичната за тази зона геология, местоположението и зареждането на вътрешните и външните буферни редове. В някои случаи на твърди скални маси, за да се подобри отбиването на материала в горната част на откоса е необходимо да се използва стабилизиращ ред сондажи. При отклонения от проектните откоси в петата и долната част на рудничното стъпало подобряването може да се постигне чрез промяна в буферния ред сондажи.

Прокарването на хоризонтални дренажни сондажи, въпреки ниските коефициенти на филтрация на масива и продължителния период за постигане на трайно осушаване и понижаване на поровото налягане, подобрява стабилитета на откоса в зоната на прокарването им.

### Литература

- [1] Георгиев, Н. З. Нанов, К. Найденов, Г. Марков, К. Еленков, И. Крумов, Ал. Караколев и Г. Миленков. (2023). *Геолого-структурно и инженерно-геоложко (геотехническо) картиране на новоразкрити руднични откоси в М 1:500*, фондов материал, НИС- СУ „Св. Климент Охридски“, София, България
- [2] Bar, N., N. R. Barton. (2018). *Rock Slope Design using Q-slope and Geophysical Survey Data*. Periodica Polytechnica Civil Engineering. doi:10.3311/PPci.12287.
- [3] Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley.
- [4] Cebrian, B. 2017. *Short course of Wall Control Optimization*. Blast Dynamics Inc., (p.251).
- [5] Hoek, E. (2007). *Blasting Damage in Rock*. Practical Rock Engineering book.
- [6] Krolkowski, Ch. (2015). *Summary of Surface Blasting and Damages with Analysis of Two Mitigation Techniques – Presplit and Smooth Blasting*. Department of Civil and Environmental Engineering University of Michigan.
- [7] Laubscher, D. H. (1990). *Mine Design: A Geomechanics Classification System for the Rating of Rock Mass in Mine Design*. Journal of the South African Institute of Mining & Metallurgy, 10, (pp. 257-272).
- [8] Marshall, N., N. Mohr. (2005). Ellatzite open pit – slope design project. SRK project number U2645, SRK Consulting, (p. 292).





**Proceedings of the XI International Geomechanics Conference  
16 – 20 September 2024, Golden Sands Resort, Bulgaria**

---

- [9] Nachev, St. G. Georgiev, I. Vasilev & M. Takeva (2020). *Geotechnical assessment of the benches in the Elatzite open pit mine after blasting*, Journal of mining and geological sciences, University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Volume 63, Sofia, Bulgaria (pp. 75-80). ISSN 2682-9525 (print), ISSN 2683-0027 (online)
- [10] Peterson, J. A. 2001. *Blast Damage Mechanisms at Ekati(TM) Mine* (Order No. MQ69811). Available from ProQuest Dissertations & Theses A&I; ProQuest Dissertations & Theses Full Text; ProQuest Dissertations & Theses Global. (304744467).