

**МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ
„СВ. ИВАН РИЛСКИ“**



ГЕОЛОГО-ПРОУЧВАТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ

КАТ. „ХИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНА ГЕОЛОГИЯ“

ас. инж. геол. **АНТОНИО ЛАКОВ**

**УСТОЙЧИВОСТ НА СКАЛНИ ОТКОСИ В УСЛОВИЯТА НА ОТКРИТИ
РУДНИЦИ И КАРИЕРИ**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационния труд за присъждане на образователна и научна
степен „доктор“

по научна специалност „Инженерна геология“

РЕЦЕНЗЕНТИ: 1. Проф. д-р Божидар Асенов Божинов
2. Проф д-р Николай Добринов Добрев

ноември 2018 г.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Дисертационният труд е представен в един том от общо 270 стр., включващ:

- основен текст с обем от 131, това число 40 бр. фигури, 21 бр. таблици, библиография от 64 заглавия;
- Приложения с резултати от полеви и лабораторни изследвания за обект „Кариера Люляката“ – Девня – Приложение А от 74 стр. и за обект „Рудник „Асарел“– Приложение В от 65 стр.

Изложението е направено в следните части:

1. ВЪВЕДЕНИЕ (2 стр.).

В тази част са представени актуалността на разглеждания проблем и са формулирани основните цели на работата.

2. СКАЛНИТЕ ОТКОСИ КАТО СТРУКТУРНИ СИСТЕМИ (3 стр.)

В тази част е представена характеристика на скалните откоси като структурни системи с техните основни характеристики и принципи на инженерногеоложки проучвания с оглед на тяхната устойчивост.

3. КЛАСИФИКАЦИИ ЗА СВОЙСТВАТА НА СКАЛНИЯ МАСИВ (18 стр.)

В тази част е представен преглед на приложимите класификационни системи за качествена оценка на свойствата на скалния масив и в частност на скалните откоси – RQD, RMR, SMR и GSI. Подробно са разгледани техните компонентни показатели, като са изяснени тяхното физическо съдържание и взаимовръзка. За повечето от тях са предложени максимално приемливи терминологични преводи на български език.

4. ЯКОСТНИ МОДЕЛИ НА СКАЛНИЯ МАСИВ. МОДЕЛ НА НОЕК – BROW (4 стр.)

В тази част е направен общ преглед на якостните модели използвани за различни условия в скалната механика. Специално внимание е обърнато на модела на Ноек-Brown, както за условията на ненарушена скала, така и за скален масив.

5. ЯКОСТ НА СРЯЗВАНЕ ПО ПУКНАТИНИ (12 стр.)

В тази част са разгледани основните модели за оценка на якостта на срязване по пукнатини, характеризирани са основните показатели на грапавост (JRS) и якост (JCS) на стените на пукнатините, както и методите за тяхното определяне, вкл. методите на полеви измервания, обработка и оценка на амасибния ефект съгласно ISRM.

6. УСТОЙЧИВОСТ НА СКАЛНИТЕ ОТКОСИ (11 стр.)

В тази част са разгледани общите механизми на обрушване в светлината на дуалното поведение на скалните откоси, а именно кинематичните методи (метод на Markland), методите на гранично равновесие (методите Bishop и Janbu) и числените методи (програмен продукт FLAC Slope).

7. ХАРАКТЕРИСТИЧНИ ПОКАЗАТЕЛИ (2 стр.)

В тази част са представени използваните статистически изчисления за определяне на характеристикните стойности на геотехническите показатели на скалите и масива в светлината на концепцията на Еврокод.

8. ОЦЕНКА НА УСТОЙЧИВОСТТА НА КАРИЕРА „ЛЮЛЯКАТА” – ДЕВНЯ (38 стр.)

В тази част са представени резултатите от полевите изследвания и тяхната обработка, съставен е геоструктурен модел на масива, определени са основните пукнатинни групи и свойствата по пукнатините, определена е якостта на скалния масив по модела на Hoek-Brown. На базата на метода на Markland за оценка на структурно контролираната неустойчивост са определени опасните типове обрушвания на скални блокове за 23 бр. точки от бордовете на кариерата, като са направени съответните заключения и препоръки.

9. УСТОЙЧИВОСТ НА ЮГОИЗТОЧНИЯ БОРД НА РУДНИК „АСАРЕЛ“ (41 стр.)

В тази част са представени резултатите от полевите и лабораторни изследвания и тяхната обработка, съставен е геоструктурен модел на масива, определени са основните пукнатинни групи и свойствата по пукнатините, определена е якостта на скалния масив по модела на Hoek-Brown. Оценени са хидрогеоложките условия и условията на динамичните въздействия върху откосите от взривни работи и земетръс. Съставени са геомеханични модели на откосите по 4 бр. профилни линии с отчитане на неблагоприятната посока на пукнатини и разломи. Извършени са вариантни решения за оценка е конфигуриране на устойчиви откоси при дълбочини на рудника до коти 630 м, 550 м и 450 м с програмния продукт FLAC Slope. Крайните решения са проверени с аналитичните методи на Bishop и Janbu, като решенията са оптимизирани с оглед на получените от тях резултати. Направени са съответните заключения.

10. ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ (2 стр.)

В тази част са обобщени резултатите от направените изследвания, като са направени изводи относно приложимостта на използваната методика за изучаване на скалните откоси в условията на открити рудници и кариери и оценка на тяхната устойчивост.

Благодарности

Авторът изказва своята благодарност към проф. д-р Венелин Желев, доц. д-р Георги Айданлийски и инж. геол. Теменуга Георгиева за тяхното решаващо участие в полевите структурно-геоложки картировки и обработка на получените резултати, на гл. ас. д-р инж. Християн Цанков за извършените полеви сеизмични измервания на масови взривявания, собствените честоти на масива и обработката на данните, и на инж. Стоян Андреев за интерпретацията на спектрите на реагиране и собствените честоти на масива на рудник „Асарел“.

1 ВЪВЕДЕНИЕ

Въпросите за достоверна оценка на устойчивостта на скалните откоси е основен при проектирането, изграждането, експлоатацията и рекултивацията на открити рудници и кариери, които до голяма степен определят икономическата ефективност от тяхното разработване. В недалечното минало подходите при тяхното решаване се свеждаха до разглеждане на скалния масив като „много твърда“ почва с прилагане на аналитични методи за оценка на устойчивостта базирани на метода на граничното равновесие. Използваните методи за оценка на структурната нарушеност на масива (машабния ефект) бяха твърде остарели, неточни или взаимствани от практиката в минното дело. Оценка на свойствата по пукнатини и свързаните с тях оценки на структурно контролираната устойчивост практически не са правени.

Тези проблеми се екстраполират със съществена значимост и актуалност и при съвременното инфраструктурно пътно и жп строителство в планински райони изградени от напукани и тектонски нарушени скални масиви, където трябва да се оформят дълбоки изкопни откоси по отритото трасе и в порталните тунелни участъци на тунели. В практиката на автора, устойчивостта на естествени или техногенни скални откоси е свързана и с изследвания при строителството на язовири и язовирни стени, както и с оценка на рисковете за недвижими паметници на културата (Мадарския конник, Ивановските скални църкви, Преображенския манастир).

Същевременно, в световната практика са използвани и усъвършенствани редица скали за определяне на качеството на скалния масив (показателите RQD, RMR и GSI), якостни модели на скалните масиви (на Bieniawski и Hoek-Brown) и якостни свойства по пукнатините (на Patton и Barton). Утвърден е и подходът за структурно контролираната устойчивост на скални блокове и кинематичните методи за оценка на тяхната устойчивост (метода на Markland). Тяхното прилагане в практиката на откритите рудници и кариери е сравнително ново и частично, като в някои случаи те все още се пренебрегват за сметка на по-стари подходи.

Действащата у нас нормативна база за проектиране на пътища и геозащитна дейност практически не разглежда въпросите за скални откоси, а издадената литература разглеждаща съвременните подходи в оценката на свойствата и устойчивостта на скалните откоси е много ограничена и се свежда до две издания.

Всичко това налага въпросите за устойчивостта на скалните откоси, вкл. и в условията на открити рудници и кариери, да бъдат комплексно разгледани в светлината на системния подход, съвместно с практиките на полевите и лабораторни структурно-геоложки и инженерногеоложки изследвания, системите за класификация на качеството на скалните масиви и свързаните с тях якостни модели и методи за устойчивост. В този аспект, целите на настоящия дисертационен труд са:

- характеризиране на скалните масиви като структурни системи с двойствено поведение в зависимост от обхвата на процесите на обрушване в него;
- преглед на съществуващите методики (полеви, качествени и количествени) за оценка свойствата на скалния масив, тяхната взаимовръзка и съвместната им приложимост;
- прилагане на комплекс от съществуващите методи при изучаване на

реални обекти и оценка на якостните свойства на скалните масиви;

- използване на получените резултати за оценка на устойчивостта на скалните откоси в светлината на структурно контролираните обрушвания на скални блокове и в условията на квазиеднородна среда;
- оценка на приложимостта на използваните подходи и методи.

При разработването на настоящия дисертационен труд са използвани данни и резултати от доклади и проекти за оценка на устойчивостта и определяне на устойчивите конфигурации на бордовете за условията на кариера „Люляката“ – Девня и рудник „Асарел“, на които авторът е бил ръководител, участвал е в структурно-геоложките и инженерногеоложки картировки и полевите опити, в обработката на първичните резултати, самостоятелно е извършил тяхното обобщаване и интерпретация, определяне на параметрите на якостните модели и оценките за устойчивост.

Авторът изказва своята благодарност към проф. д-р Венелин Желев, доц. д-р Георги Айданлийски и инж. геол. Теменуга Георгиева за тяхното решаващо участие в полевите структурно-геоложки картировки и обработка на получените резултати, на гл. ас. д-р инж. Християн Цанков за извършените полеви сеизмични измервания на масови взривявания, собствените честоти на масива и обработката на данните, и на инж. Стоян Андреев за интерпретацията на спектрите на реагиране и собствените честоти на масива на рудник „Асарел“.

2 СКАЛНИТЕ ОТКОСИ КАТО СТРУКТУРНИ СИСТЕМИ

Естествените и техногенни скални откоси представляват сложни структурни системи, като всяка от тях често пъти е с неповторими специфични особености и поведение. От гледна точка на тяхната устойчивост това се изразява в голямото разнообразие от индивидуални прояви, форми, механизми, обхват и динамика на процесите на разрушаване, като за всяко изследване трябва да се използва повече или по-малко индивидуален подход. Въпреки това, в много от случаите те имат една обща характеристика, която се изразява в това, че тези процеси са структурно определени, т.е. те се „контролират“ главно от наличието на пукнатини, разломи, повърхнини на напластяване и шистозност и др., като те определят формата и размерите на неустойчивите блокове и блокови комбинации в откосите, силовите взаимоотношения между тях и кинематиката на процесите (възможните посоки и траектории на движения). Независимо от това разнообразие, системното изучаване на проявите на неустойчивост в скални масиви и на посочените по-горе особености, могат да се изведат следните основни принципи на инженерногеолошко изследване и оценка на устойчивостта на скални откоси:

1. Принцип на системния подход. Според него скалните откоси се разглеждат като природни или техногенни динамични системи, характеризиращи се със следните особености:

- пространствена (геометрична) структура съставена от голям брой елементи, определени от вида, пространствената ориентация и разстоянието между пукнатините в дадена група, пукнатинните системи и разливните нарушения в масива, които оформят блокове с различна форма и размери;
- функционално единство и йерархичност на взаимодействието между отделни блокове и/или групи от блокове в откоса, определено от локалното и общо напрегнатото състояние на масива, от свойствата на

ненарушения масив и свойствата по пукнатините изразяващо се в предаването, в по-голяма или в по-малка степен, на всяко изменението на състоянието или въздействието на един или няколко елемента от системата върху цялата система. Обхватът (границите) на изследване на системата се определя от най-високия йерархичен порядък от отделни и/или групи блокове, чието състояние (устойчивост) зависи състоянието (устойчивостта) на скалния откос;

- саморегулация и адаптивност на системата, които се изразяват в способността ѝ да се намира в равновесие (устойчивост) спрямо външните и вътрешни въздействия;
- динамичност на системата, изразяваща се в периодична и/или непрекъсната промяна във времето.

2. Принцип на мащабния ефект. Този принцип отчита следните аспекти:

- структурно отслабване на масива предизвикано от влиянието на макропукнатини, нееднородности и дефекти в структурата и текстурата на скалите. Количествено то се изразява чрез т.н. „мащабен ефект“, който обикновено отразява намаляването на съпротивителните свойства на масива с увеличаване на обхвата на въздействие на геодинамичния или антропогенен опасен процес;
- повърхнините на обрушване отделят скални призми с подобни форми и различаващи се по своите обеми, често „хомотетично“ включени една в друга, а техните обеми се различават „мащабно“;
- състоянието (устойчивостта) на големи групи блокове или на скалните откоси като цяло често се определя от устойчивостта на единични блокове със значително по малки размери, които играят ролята на т.н. „ключов блок“.
- съотношението на обхвата на свлачищно-срутищния процес към размера на средния структурен блок в масива. При близки или до „n“-кратни съотношения може да се приеме, че устойчивостта е структурно контролирана от взаимодействието между блокове по отделящите ги пукнатини, докато при значително по-големи съотношения отделните структурни елементи (блокове и пукнатини) губят своето индивидуално влияние върху средата, като тя като цяло да се разглежда като „квазиеднородна“ и се характеризира с интегрален якостно-деформационен модел.

3. Принцип на геодинамичното подобие. От гледна точка на оценка на устойчивостта на скалните откоси широко се използва принципът на геодинамичното подобие, който може да се формулира по следния начин: геодинамично аналогични (подобни) участъци се характеризират с аналогични процеси на развитие (устойчивост). За да се осигури необходимата степен на подобие трябва да бъдат изпълнени т.н. общи критерии на (геодинамично) подобие:

Критерий на геометрично подобие – два обекта са геометрично подобни, ако притежават подобие на геометричните им характеристики. Това обикновено са линейните размери на откосите, дебелините и пространственото разположение на пластовете, ориентацията и гъстотата на пукнатините и размерите на блоковете, които те отделят.

Критерий на структурно (механично, функционално) подобие – в

структурно подобни обекти протичат процеси, които имат общ характер и могат да се опишат с общи параметри и физически (математически) функции. Отнесен към скалните откоси този критерий изисква подобие на свойствата на масива и тяхното разпределение, както и подобно напрегнато и деформирано състояние.

Този принцип позволява създаването на общи класификационни схеми за оценка на качествата на скалния масив, общи якостно-деформационни модели и модели за оценка на устойчивостта на скалните откоси.

4. Вероятностен или детерминистичен подход при оценка на устойчивостта. Вероятностният подход се основава на факта, че стойностите на физико-механичните свойства на скалните масиви и геометричните характеристики на пукнатинните системи в тях се характеризират със индивидуални статистически разпределения в пространството, които, от своя страна, следствие на възможните комбинации на от тези стойности дефинират определена статистическа (вероятностна) значимост на оценката на устойчивостта. Вероятностният подход включва времева и/или пространствена вероятност, изразена чрез честота във времето и/или пространството на проява на събития с определен пространствен обхват (обем). Това се дефинира като геодинамичен хазарт, които се описва чрез Поасонові вероятности модели на повтаряемост.

Детерминистичния подход при оценката на устойчивостта на скалните откоси предполага, че сигурността (устойчивостта) на скалния откос да се определя по възможното максимално проявление на опасния геодинамичен процес (срутване, свличане), оценен за период време, значително надвишаващо обичайния експлоатационен период на откоса.

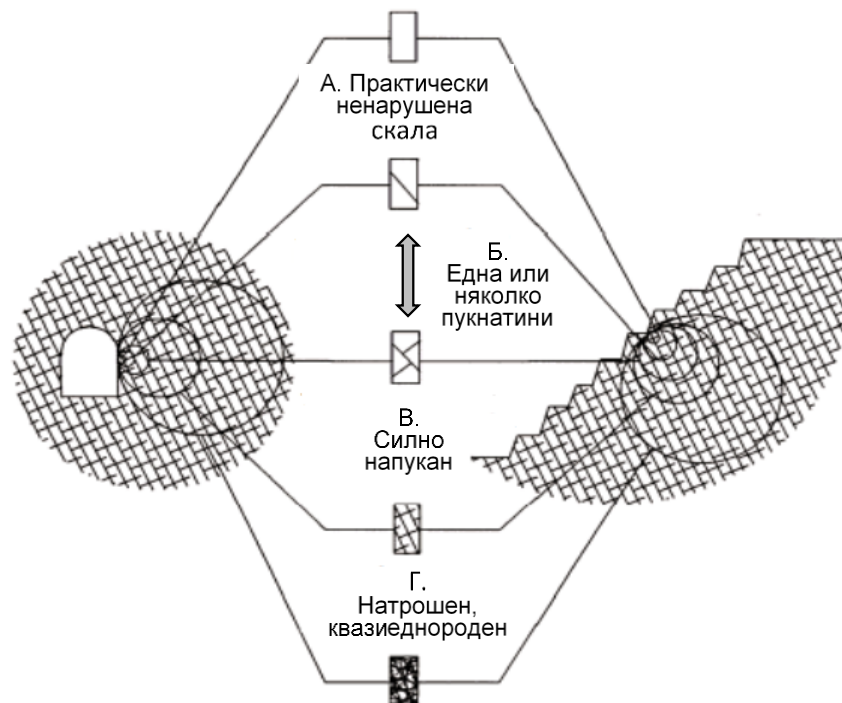
Тези общи принципи са представени в последователност и взаимна обусловеност, които съответстват на реалните причинно-следствени връзки между условията и факторите, определящи устойчивостта на скалните откоси са основа за разработване на настоящата работа.

3 КЛАСИФИКАЦИИ ЗА СВОЙСТВАТА НА СКАЛНИЯ МАСИВ

Разглеждайки скалния масив като структурна система могат да се дефинират следните три групи якостни свойства, които го характеризират:

- свойства на скалната матрица, представена от практически структурно ненарушената скала в условията на нейното залягане, които характеризират скалните блокове в масива.
- свойства по пукнатини, разломи като зони на структурна нарушеност на масива (обикновено в макромасштаб);
- интегрални свойства на масива, съответстващи на „квазиеднородна“ скала. В този случай се прилагат якостни модели, коригирани с показатели на структурна нарушеност на масива, определяни с различни емпирични системи за качествена характеристика на скалния масив.
- Приложимостта на определените по-горе групи якостни свойства съотнесени към различните обхвати на мащабния ефект и съответните им напрегнати състояния са представени на Фиг. 3-1. От нея се вижда, че в обхвата на един откос (Условие А) в напукан скален откос тежестното влияние на якостта на скалната матрица е минимално до пренебрежимо. Влиянието на якостта по пукнатините е определящо когато височината на скалния откос е съпоставима с дължината (издържаността) на пукнатините в масива и средния размер на оформения от тях елементарен структурен

блок (Условия Б), а устойчивостта се определя като структурно контролирана. Интегралните якостни модели на свойствата са приложими в случая на значителна структурна нарушеност (напуканост – Условие В) и най-вече в условията на квазиеднородност на скалния масив (Условие Г).



Фиг. 3-1. Приложимост на групите якостни модели в зависимост от мащабния ефект (по Hoek and Brown, 1997).

Като основни приложими и взаимосвързани за оценка на якостните свойства на скалните масиви, по-долу ще бъдат разгледани по-подробно следните най-широко използвани и утвърдени в практиката класификационни системи:

- Показател за качество на скалата (Rock Quality Designation - RQD)
- Качество на скалния масив (Rock Mass Rating - RMR)
- Качество на скалния откос (Slope Mass Rating - SMR)
- Геоложки индекс на якостта (Geological Strength Index - GSI).

3.1 Показател за качество на скалата (RQD)

Показателят RQD е широко известен в практиката и се изчислява като отношението между общата дължина на късовете по-дълги от 10 cm или 2 пъти диаметъра на ядката от даден рейс на сондиране към общата дължина на рейса.

Hudson и Priest (1979) предлагат следната формула за връзка между показателя RQD и гъстотата на пукнатините λ (брой/линеен метър):

$$(1) \quad RQD = 100e^{-0.1\lambda} (1+0.1\lambda).$$

Доколкото показателят „ λ “, който се определя от измервания на сондажна ядка, това е неприложимо при полевите картировки. При тях основно се определя гъстотата на пукнатините по различните пукнатинни групи в масива, което позволява определянето на показателя J_v (брой на пукнатините в 1 кубичен метър от масива), а чрез съответната корелационна и на стойността на

показателя:

$$(2) \quad RQD = 110 - 2.5J_V$$

$$(3) \quad J_V = \sum 1/S_i + N_s/5$$

където S_i е средното разстояние между пукнатините от група „ i “ в метри, а N_s е общият брой на случайните пукнатини.

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND OTHER RATINGS									
Parameter			Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	<1 MPa
	Rating		15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core quality (%)		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	<25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	<60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)	Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation <1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation <1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge <5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >6 mm thick or Separation >5 mm Continuous			
		Rating		30	25	20	10	0	
5	Groundwater	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	>125		
		Joint water pressure (MPa) or principal stress	0	<0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	>0.5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
		Rating		15	10	7	4	0	
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations			Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels & mines		0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations		0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes		0	-5	-25	-50			
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS									
Rating			30 - 41	20 - 31	10 - 21	0 - 11	< 11		
Class number			I	II	III	IV	V		
Description			Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock		
D. MEANING OF ROCK CLASSES									
Class number			I	II	III	IV	V		
Average stand-up time			20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span		
Cohesion of rock mass (kPa)			> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	<100		
Friction angle of rock mass (deg)			> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	<15		
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions									
Discontinuity length (persistence)			<1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
Rating			6	4	2	1	0		
Separation (aperture)			None	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
Rating			6	5	4	1	0		
Roughness			Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided		
Rating			6	5	3	1	0		
Infilling (gouge)			None	Hard filling <5 mm	Hard filling >5 mm	Soft filling <5 mm	Soft filling >5 mm		
Rating			6	4	2	2	0		
Weathering			Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed		
Rating			6	5	3	1	0		
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING*									
Strike perpendicular to tunnel axis					Strike parallel to tunnel axis				
Drive with dip - Dip 45 - 90°		Drive with dip - Dip 20 - 45°			Dip 45 - 90°		Dip 20 - 45°		
Very favourable		Favourable			Very unfavourable		Fair		
Drive against dip - Dip 45 - 90°		Drive against dip - Dip 20 - 45°			Dip 0 - 20 - irrespective of strike*				
Fair		Unfavourable			Fair				

* Some conditions are mutually exclusive. For example, if infilling is present, the roughness of the surface will be overshadowed by the influence of the gouge. In such cases use A.4 directly.

** Modified after Wickham et al (1972).

Фиг. 3-2. Класификация по показателя RMR89.

Този подход е използван и по-нататък в работата при обработката на данните от полевите работи.

3.2 Качество на скалния масив (RMR)

Класификационната система RMR е съставена от Z.T. Bieniawski в 1973 г. (Bieniawski, 1973), като се основава на изучеността на 351 обекта. Тя има две основни модификации – базова от 1976 г. и от допълнена 1989 г. (Bieniawski, 1989). Съответно показателите се означават като RMR₇₆ и RMR₈₉. Класификацията на масива се извършва на базата на точкова система (рейтинг – rating) на определени критерии, представени на Фиг. 3-2 (за RMR₈₉).

Табл. 3-1 Стойности на коефициентите за влиянието на пукнатините

Table 2 SMR = RMR _B + (F ₁ x F ₂ x F ₃) + F ₄ (ROMANA, 1985)					
ADJUSTING FACTORS FOR JOINTS (F ₁ , F ₂ , F ₃)	α_j – DIP DIRECTION OF JOINT α_s – DIP DIRECTION OF SLOPE	β_j – DIP OF JOINT β_s – DIP OF SLOPE			
	VERY FAVOURABLE	FAVOURABLE	FAIR	UNFAVOURABLE	VERY UNFAVOURABLE
PLANE FAILURE $ \alpha_j - \alpha_s =$ TOPPLING $ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ =$ F ₁ VALUE	> 30°	30° - 20°	20° - 10°	10° - 5°	< 5°
RELATIONSHIP	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
$F_1 = (1 - \ln \alpha_j - \alpha_s)^2$					
F ₂ VALUE PLANE FAILURE $ \beta_j =$ TOPPLING RELATIONSHIP	< 20°	20° - 30°	30° - 35°	35° - 45°	> 45°
	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
	1.00				
	$F_2 = \lg^2 \beta_j$				
PLANE FAILURE $\beta_j - \beta_s =$ TOPPLING $\beta_j + \beta_s =$ F ₃ VALUE	> 10°	10° - 0°	0°	0° - (-10°)	< (-10°)
RELATIONSHIP	< 110°	110° - 120°	> 120°	-	-
	0	-6	-25	-50	-60
F ₃ (BIENIAWSKI ADJUSTMENT RATINGS FOR JOINTS ORIENTATION, 1976)					
F ₄ ADJUSTING FACTOR FOR EXCAVATION METHOD F ₄ VALUE	F ₄ = EMPIRICAL VALUES FOR METHOD OF EXCAVATION				
	NATURAL SLOPE	PRESPLITTING	SMOOTH BLASTING	BLASTING or MECHANICAL	DEFICIENT BLASTING
	+15	+10	+8	0	-8

съгласно класификацията SMR.

Забележка: P – плоско хлъзгане; T - преобръщане; α_j – посока на пукнатината; α_s – посока на откоса; β_j – наклон на пукнатината; β_s – наклон на откоса, където α е ъгълът между посоките на откосната повърхнина и пукнатината.

Включените в нея оценки по отделните показатели са следните:

- Якост на едноосов натиск на ненарушена скала (strength of intact rock material) – m. A.1
- Rock quality designation (RQD) – m. A.2
- Разстояние между пукнатините (Spacing of discontinuities) – A.3
- Състояние на пукнатините (Condition of discontinuities) – m. A.4
- Условия на подземните води (groundwater) – m. A.5
- Ориентация на пукнатините (discontinuity orientation) – m. B

Общата стойност на показателя се получава след сумиране на оценките по отделните показатели:

$$(4) \quad RMR_{89} = R_{A.1} + R_{A.2} + R_{A.3} + R_{A.4} + R_{A.5} + R_B.$$

3.3 Класификация по качество на скалния откос (SMR)

Класификацията Slope Mass Rating (SMR), предложена Romana (1985) се основава на факта, че RMR_{89} не позволява достатъчно добро отчитане на влиянието на пукнатините върху устойчивостта на откосите. Тази класификационна система е получена на базата на основния показател RMR_{76} чрез добавяне на оценка за съотношенията „откос – пукнатини“ и оценка за метода на разработване (Табл. 3-1):

$$(5) \quad SMR = RMR_{76} + (F1 \times F2 \times F3) + F4$$

3.4 Класификация по Геоложки индекс на якостта (GSI)

Показателят GSI е предложен от Е. Ноек в 1994 г. (Ноек, 1997), поради необходимостта от оценка на свойствата на скални масиви с ниски стойности на показателя RMR. Основава се на качествена визуална оценка на напукаността на масива и състоянието на пукнатините (**Error! Reference source not found.**

По отношение на приложимостта на показателя GSI за скални откоси могат да се направят следните коментари и заключения:

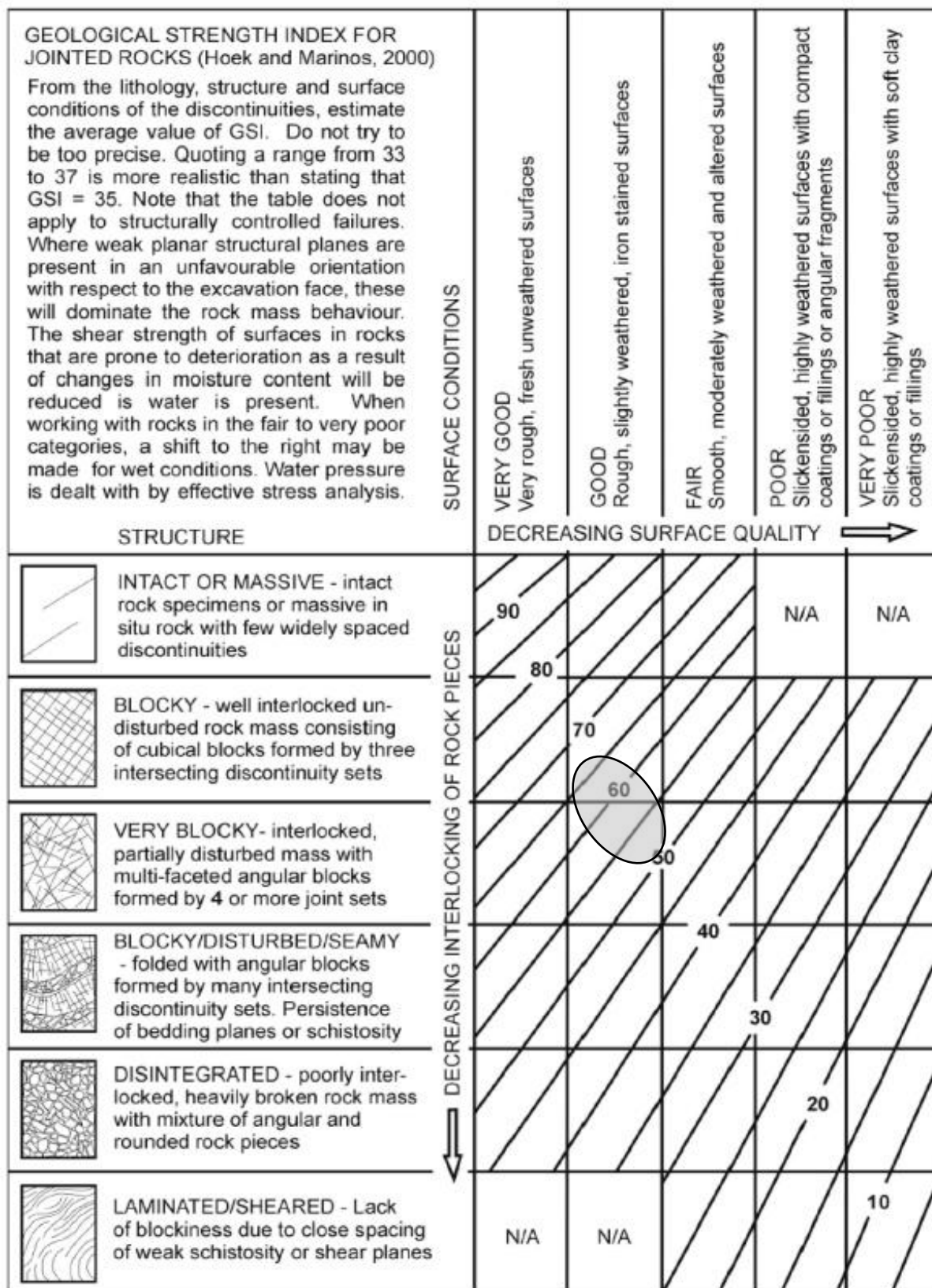
- Оценката на показателите от скалата за GSI е строго визуална (вкл. и субективна), което на практика позволява оценката на показателя GSI да бъде по-скоро интервална;
- Най-добре е тя да се прилага върху свежи техногенни разкрития с по-голяма площ. Поради процесите на изветряне и разуплътняване естествените разкрития могат да бъдат непредставителни по отношение скалния масив в дълбочина. При по-специфични условия на скалния масив структурата трябва да се оцени не само по приложените схеми, но и на базата на пространствена схема на геоложкия строеж и напуканост;
- Влиянието на взривните работи върху състоянието на разкритията трябва да се елиминира;
- Използването на данни за напукаността от сондажна ядка (напр. от показателя RQD) изисква тяхната пространствена интерпретация, което е свързано с изисквания за нейната ориентация;
- Класификацията е приложима за „квазиеднороден“ скален масив с изотропна текстура и/или относително равномерна пространствена степен на напуканост, осигуряваща заклиняване между блоковете. В случаите на преобладаващо наслояване и/или фолиация, или на една пукнатинна група, устойчивостта на скалния откос се определя от тяхната ориентация, т.е. тя е структурно контролирана и показателят GSI не е приложим;
- Показателят GSI е отчита влиянието на порния натиск в масива, те той се отнася само за условията на ефективни напрежение в скалния масив. Влиянието на подземните води може да се отчете само като влошаващо физическото състояние на стените пукнатините и запълнителя.

В настоящата работа е използвана скалата на Sonmez и Ulusay в нейната модификация от 2002 г. (Sonmez and Ulusay, 2002) – **Error! Reference source not found.** Модифицираната скала характеризира количествено степента на структурна нарушеност (вертикалната скала) чрез показателя SR (Structural Rating), който е оценен по включената логаритмичната скала, в зависимост от показателя за брой на пукнатини в 1 m^3 (J_v), Във версията от 2002 г.

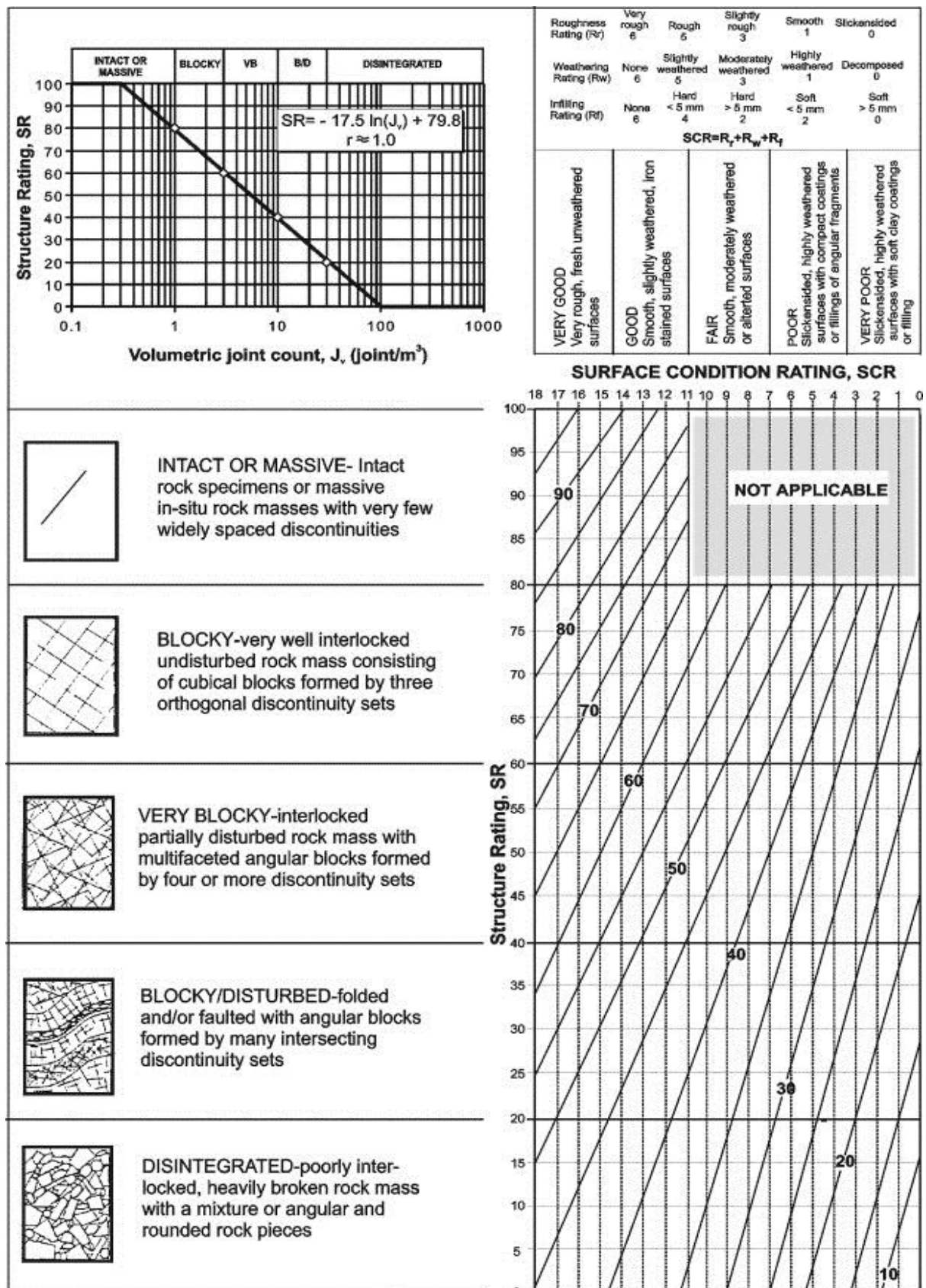
криволинейната зависимост е апроксимирана в обхвата на $J_v = 0,3 \div 10$ със следното уравнение:

$$(6) \quad SR = -17.5 \ln(J_v) + 79.8.$$

При $J_v < 0,3$ $SR = 100$, а при $J_v > 10$ $SR = 0$.



Фиг. 3-3. Стандартна скала на Ноек за определяне на GSI.



Фиг. 3-4. Модифицирана скала по Sonmez и Ulusay (2002) за определяне на GSI.

Показателят за състоянието на стените на пукнатините (Surface Condition

Rating - SCR) е сума от следните показатели:

$$(7) \quad SCR = R_r + R_w + R_f,$$

където R_r , R_w и R_f са оценките съответно за грапавостта, изветрянето и запълнителя в пукнатините съгласно показаната по-горе класификация за RMR_{76} .

3.5 Връзка между показателите RMR и GSI

Основните връзки между показателите RMR и GSI са предложени от Hoek, et al (1995):

$$(8) \quad GSI = RMR_{76}, \text{ и}$$

$$(9) \quad GSI = RMR_{89} - 5.$$

Втората зависимост се приема че е валидна при следните условия:

- доколкото показателят GSI не отчита влиянието на водата върху напрегнатото състояние на масива, то стойностите на RMR_{89} трябва да са определени за „напълно сухи“ условия на масива, т.е. оценката на показателя по т. A.5 от класификацията на Bieniawski и $R_{A.5}=15$;
- при стойности на $RMR_{89} > 23$. За стойности $RMR_{89} \leq 23$ Hoek предлага формулата:

$$(10) \quad GSI = 9 \ln Q' + 44$$

където Q' е показателят от Q-системата на Barton, от която са изключени показателите, отчитащи влиянието на подземната вода. Същевременно Hoek и Marinos (2007) уточняват, че тази формула не е потвърдена в практиката, а Pells et al (2016) е скептичен към нейното използване, доколкото тя не се основава на практически примери.

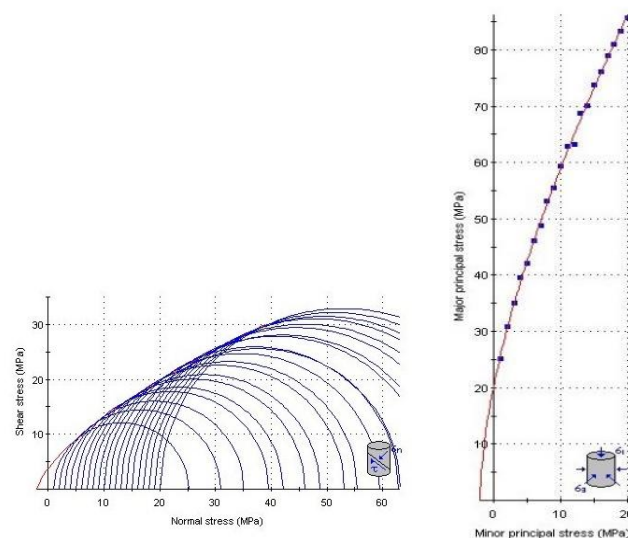
4 ЯКОСТНИ МОДЕЛИ НА СКАЛНИЯ МАСИВ, МОДЕЛ НА НОЕК - BROWN

В съвременната практика най-широко се използва якостният модел на Hoek-Brown. Моделът е предложен през 1988 г., като в последствие и редица модификации и разширения (Hoek and Marinos, 2007). Основно предимство на окончателната версия на обобщения модел е, че той е приложим към якостното поведение, както на ненарушена скала, така и за условията на скален масив, чрез отчитане на „мащабния ефект“ посредством отчитането на показателя GSI и показателя на нарушеност D (Disturbance factor), отчитащ степента на нарушаване на масива в следствие на изкопните и взривни работи (Hoek, Carranza-Torres and Corkum, 2002).

Обобщеният якостен критерий на Hoek-Brown се описва от уравнението:

$$(11) \quad \sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

където σ_1 и σ_3 са главните нормални напрежения; σ_{ci} е якостта на едноосов натиск на скалата; m_i , s и a са емпирични якостни коефициенти; индексът „i“ (intact) се отнася за ненарушената скала.



Фиг. 4-1 Якостен модел на Хоук & Браун в координатни

Степенният показател „а“ за ненарушената скала има стойност $a=0,5$.

За реални напукани скални масиви те се определят съгласно стойностите на GSI и D по следния начин:

$$(12) \quad m_b = m_i \exp \left(GSI - \frac{100}{28} - 14D \right)$$

$$(13) \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

$$(14) \quad s = \exp \left(GSI - \frac{100}{9} - 3D \right).$$

Съгласно Хоук (2002) показателят „D“ се характеризира в зависимост от състоянието на откоса при неговото оформяне – Фиг. 4-2.

	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation

Фиг. 4-2. Определяне на показателя на нарушеност D за скални откоси по Хоук (2002).

За получаване на показателите на якостта на срязване Hoek et al (2002) зависимостта „ σ_1 - σ_3 “ да се линеаризира в участъка от началото до стойността на σ_3 , съответстваща на напреженията в масива. За условията на скални откоси, те установяват следната зависимост:

$$(15) \quad \frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma'_{cm}} = 0.72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91}$$

Съвместната обработка на данните от лабораторни изследвания и данните за показателя GSI са извършени с програмния продукт RockLab v1.033.

5 ЯКОСТ НА СРЯЗВАНЕ ПО ПУКНАТИНИ

Разглеждайки пукнатините като елементи на структурната нарушеност на скалите, те определят зони със съществено по-ниски якостни свойства в масива и по които се проявяват значително по-изразени тангенциални премествания и разрушения. Това особено е валидно за условията на скални откоси, при които нивото на напрежения е сравнително ниско и не предизвиква съществени нарушения във скалната матрица и устойчивостта на блоковете в откоса се контролира от наличието, състоянието и якостта на пукнатините.

От тази гледна точка най-важна характеристика на пукнатините (както и на другите зони на структурно отслабване на масива – повърхнини на напластяване и настиляване, разривни нарушения и др.) е якостта на срязване по направление на тяхното развитие.

Якостните модели на срязване по пукнатини са се развивали във времето, но всички от тях се основават на следните основни предпоставки:

- Пукнатините в скалните масиви представляват равнини или контури с ограничена площ, по които е настъпило пълно разрушаване на структурните;
- В обхвата на срязване пукнатината е издържана;
- По повърхнината липсва кохезия;
- Съпротивление на хлъзгане се изразява само чрез ъгъл на триене.

5.1 Хлъзгане по гладка пукнатина (Линеен модел на срязване)

Най-простият якостен модел, използван за пукнатини е този на Кулон за триене по готова линейна повърхнина:

$$(16) \quad \tau = \sigma_n \tan \phi_r$$

където σ_n е нормалното напрежение към повърхнината на пукнатината, по която става хлъзгането; ϕ_r е остатъчният ъгъл на триене по стените на пукнатината.

При неизветрели материали от стените на пукнатините се приема, че $\phi_r = \phi_b$ т.н. базов ъгъл на триене, съответстващ на коефициента на триене сработени повърхности на стените на пукнативата при при „безкрайно“ голямо преместване по нея. Barton и Choubey (1977) предлагат редни стойности за ϕ_b то типове скали (

Табл. 5-1).

Табл. 5-1 Средни стойности за ϕ_b по типове скали, Barton и Choubey (1977).

Sedimentary rocks			basic friction angle ϕ_b			Metamorphic rocks			basic friction angle ϕ_b			Igneous rocks			basic friction angle ϕ_b		
Sandstone	dry	26 - 35 (32) ^{*)}	Amphibolite	dry	32	Basalt	wet	31 - 36	Gneiss	wet	23 - 26	Granite, - fine-grained	wet	35 - 38	Granite, - coarse-grained	wet	29 - 31
	wet	25 - 34 (31)		dry	26 - 29		dry	31 - 35		dry	31 - 35						
Siltstone	wet	27 - 31	Slate	wet	21	- coarse-grained	wet	31 - 33	Slate	dry	25 - 30	Porphyry	dry	31 - 35	Dolerite	wet	32
	dry	31 - 33		dry	25 - 30		dry	31 - 35		dry	36						
Shale	wet	27															
Conglomerate	dry	35															
Chalk	wet	30															
Limestone	wet	27 - 35															
	dry	31 - 37															

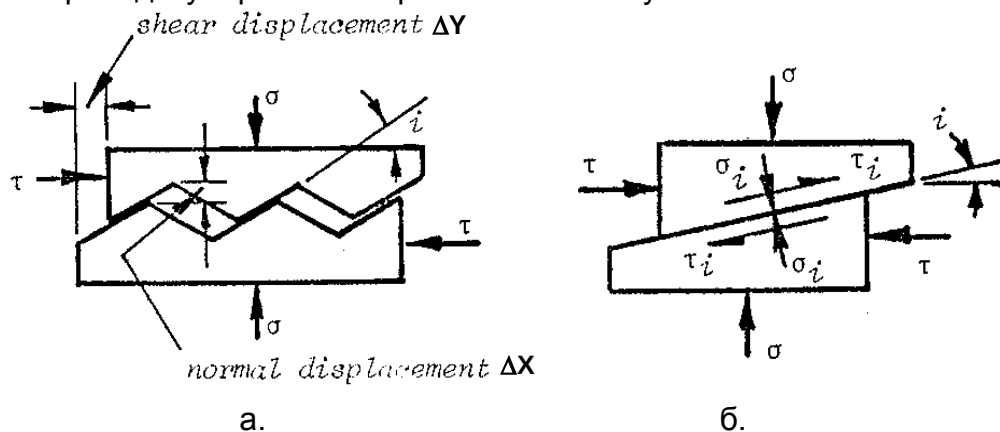
^{a)} numbers in parenthesis are average values

5.2 Хлъзгане по неравна пукнатина (двулинеен якостен модел)

Голям брой полеви експерименти, извършени през 60-те и 70-години на 20 век са доказали, че якостната диаграма на срязване по пукнатина е криволинейна. Това до голяма степен се дължи на наличието на систематичната или случайна вълнообразност и грапавост на релефа на стените на пукнатините, като при взаимното им преместване срязващите напрежения трябва да преодолеят не само съпротивленията от триене, но и неравностите по направлението на срязване (Фиг. 5-1), числено изразяване чрез ъгъла на дилатансия определен като:

$$(17) \quad i = a \tan\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)$$

където Δx и Δy са съответно преместване на стените на пукнатината по посока и перпендикулярно на направлението на пукнатината.



Фиг. 5-1. Схема на дилатантно хлъзгане по назъбена повърхност (а) и схема на силовото разпределение по стената на зъба (б).

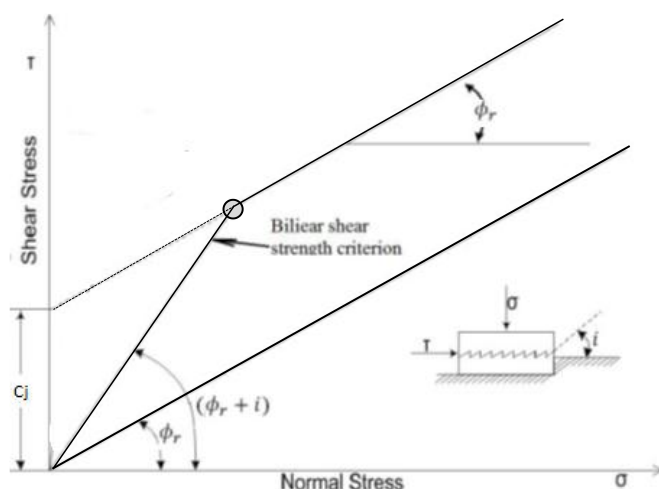
Аналитичният израз за първия клон на якостната зависимост се представя от следната зависимост (Фиг. 5-2):

$$(18) \quad \tau = \sigma_n \tan(\phi_b + i).$$

Вторият клон на якостната диаграма може да се опише със стандартното уравнение на Coulomb:

$$(19) \quad \tau = \sigma_n \tan \phi_b + C_j$$

където C_j е приведената кохезия по пукнатината (Фиг. 5-2). Тя няма реален физичен смисъл и се използва като параметър в якостното уравнение.



Фиг. 5-2. Двулинеен якостен модел по Patton (1996).

5.3 Хлъзгане по неравна пукнатина (криволинеен якостен модел)

Действителните процеси на разрушаване на неравностите по пукнатини започват практически веднага след натоварване, като първо “сработват” най-тесните и най-високи неравности. С нарастване на премествания настъпва общо изглаждане на повърхнината на хлъзгане, като степента на изглаждане нараства с увеличаване на нормалните напрежения към нея. Това на практика означава, че мобилизираната приведена кохезия по пукнатината зависи от нормалните напрежения към нея, което определя общия криволинеен вид на якостната крива. За нейното описание различните автори въвеждат емпирични изрази като функции от ъгъла „i“ и якостта на натиск на стените на пукнатината (Илов, 2004 и др.).

Най-широко използваната зависимост за определяне на якостта на срязване по пукнатина е тази на Barton (Barton, 1973, 1976), като нейният аналитичен израз е:

$$(20) \quad \tau = \sigma_n \tan \left[\phi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$$

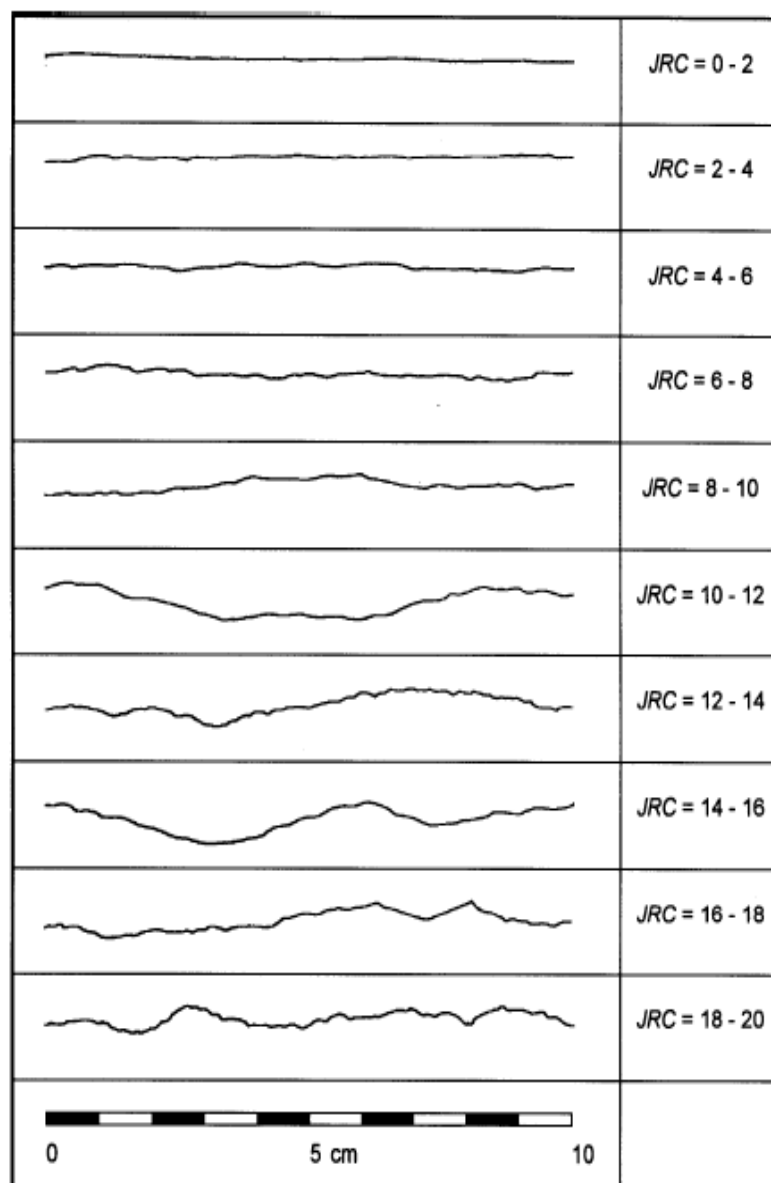
където σ_n е нормалното напрежение върху пукнатината; ϕ_b е базовия ъгъл на триене за скалата; JRC е коефициентът на грапавост на пукнатините (Joint Roughness Coefficient); JCS е якостта на стените на пукнатините (Joint Compression Strength).

Наличието на запълнител на пукнатината или покритие на стените ѝ (дори частично) от материали с различни физични и якостна свойства от тези на скалата (обикновено от дисперсен тип) оказват съществено влияние върху механичното ѝ поведение, при което трябва да се отчита неговата дебелина, състав и произход.

5.3.1 Определяне на показателя JRS

За определяне на показателя JRS Barton and Choubey (1977) предлагат 10-

степенна стандартна скала за грапавост на профила на стените на пукнатините, възприета по-късно и от Suggested methods ... (2006), спрямо която се сравняват визуално заснети профили на стените на пукнатини на терена с дължина от 10 см (Фиг. 5-3).



Фиг. 5-3. Стандартна скала за показателя JRC по Barton and Choubey (1977).



Фиг. 5-4. Заснемане на грапавостта на стените на пукнатинните повърхности с помощта на милиметрова хартия и показалец: (а)

постановка и (б) краен резултат.

При настоящата разработка заснемането на профилите на терена беше извършвано върху милиметрова хартия с дървена рейка и показалец с конусен връх (Фиг. 5-4).

5.3.2 Определяне на показателя JCS

Съгласно изискванията на Suggested methods ...(2007) стойностите на показателя JCS се определят с изпитване с чук на Schmidt тип L (Фиг. 5-5) при използване на номограмата на Фиг. 5-6 и при отчитане на посоката на удара.



Фиг. 5-5. Методика на теренно определяне на стойностите на якостта на масива с помощта на чук на Schmidt: (а) подготовка за измерване и (б) фиксиране на отчета на скалата при вертикална и (в) хоризонтална ориентация на инструмента.

Препоръчва се броят на определенията за една точка на измерване да бъде минимум 10 бр., като за получаване на достоверна средна стойност се обработват стойностите над медианната, за съответната съвкупност.

За определяне на якостта на натиск на стените на пукнатините (JCS) е използвана следната формула (Miller 1965):

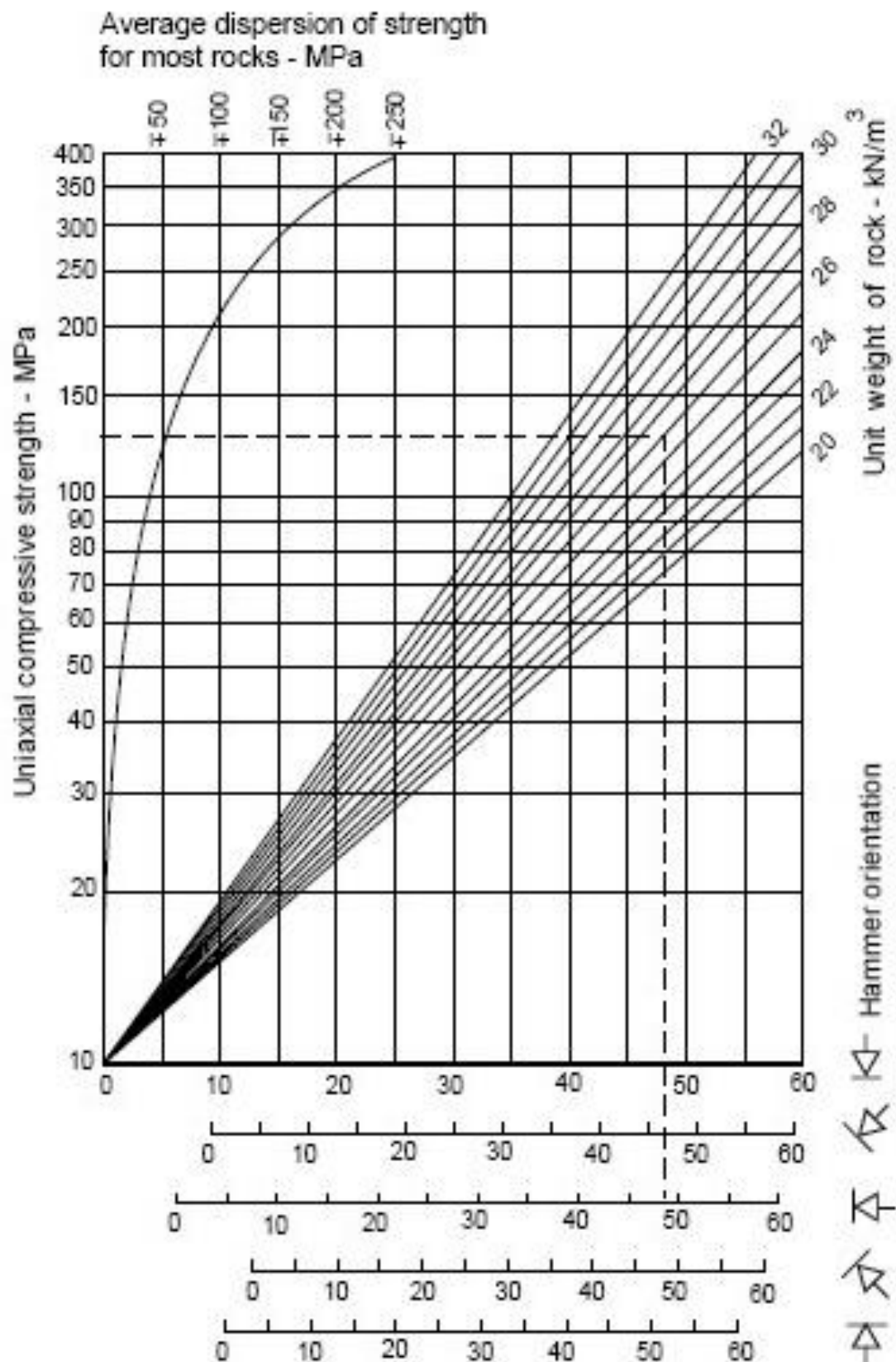
$$(21) \quad \log(JCS) = 0,00088\gamma R + 1,01,$$

ъдето γ е обемното тегло на скалата, а R е отчетът с чука на Щмидт във вертикална посока.

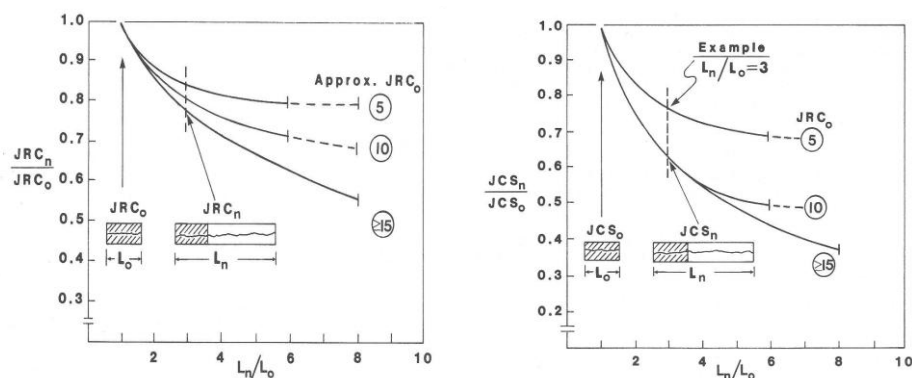
5.3.3 Мащабен ефект при якостта на срязване по пукнатини

В резултат от голям брой изследвания на пукнатини, на отливки на пукнатини и обстоен литературен анализ Bandis et al (1981) установява значително влияние на мащабния ефект върху следните характеристики на пукнатините и техните свойства:

- големина на преместванията за преодоляване на върховата якост;
- големината на дилатансията;
- влияние на неравностите и грапавините и показателя JRC върху съпротивленията на триене;
- големината и разпределението на контактните зони между стените на пукнатините.



Фиг. 5-6. Номограма за определяне показателя JCS по данни от чук на Schmidt тип L.



Фиг. 5-7. Зависимости на мащабния ефект за показателите JRC и JCS (Bandis et al, 1981).

На базата на лабораторни опити върху гипсови образци Bandis (Bandis et al, 1981 - Фиг. 5-7) приема следните зависимости на мащабния ефект по отношение на показателите JCS и JRC с достатъчна точност могат да се опишат със следните зависимости:

$$(22) \quad JRC^{joint} = JRC_0 \left(\frac{L_{joint}}{L_0} \right)^{-0.02JRC_0}$$

$$(23) \quad JCS^{joint} = JCS_0 \left(\frac{L_{joint}}{L_0} \right)^{-0.03JCS_0}$$

където JCS_0 и JRC_0 са стойностите на показателите определени при изследванията върху пукнатини с дължина на профила L_0 ; JCS^{joint} и JRC^{joint} са стойностите на показателите по реални пукнатини с дължини L^{joint} .

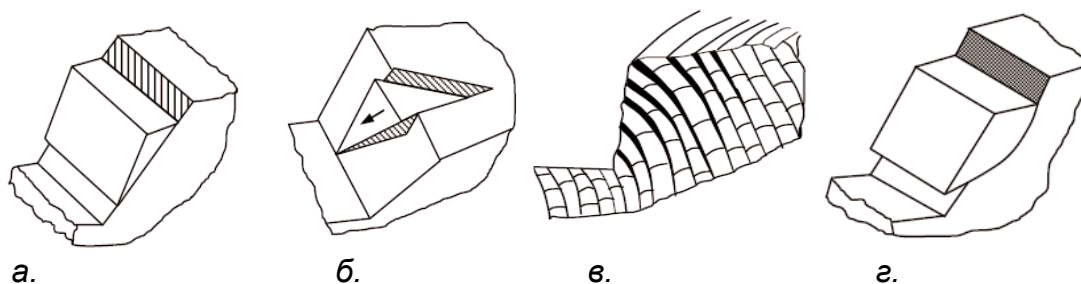
Доколкото извършените лабораторни и полеви опити за определяне на зависимостите от Фиг. 5-7 технически са били ограничени са върху тела с еквивалентни дължини на пукнатини до 6-8 м, то те все още остават дискуссионни, като някои автори (Helgstedt, 1997) ограничават тяхната валидност до пукнатини с $JRC_0 < 10$ дължини $L^{joint} < 10$ м. Въпреки това Ноек (2007) и др. приемат, че от гледна точка на тяхната простота и възможности за многократното им прилагане, използването им в практиката е достатъчно приемливо за сметка на провеждане на малко на брой скъпо струващи и сложни полеви опити.

6 УСТОЙЧИВОСТ НА СКАЛНИ ОТКОСИ

6.1 Общи механизми на обрушване

Както беше отбелязано в т. 2. скални откоси представляват сложни структурни системи. От гледна точка на структурната предопределеност, механизмите на разрушаване на скалните откоси могат да се разглеждат в две основни групи:

а. Механизми, при които определящи за устойчивостта са съпротивленията на срязване по пукнатини. Това са практически всички модели на разрушаване на единични блокове или блокови комбинации, при които кинематиката на процеса е ориентирана по посока на една или няколко пукнатини (Фиг. 6-1, а-в). Те най-общо те се характеризират като процеси на хлъзгане (sliding), преобръщане (toppling).



Фиг. 6-1. Основни модели на разрушаване на единични блокове или блокови комбинации – а. блоково хлъзгане по линейна повърхнина, б. клиново хлъзгане, в. преобръщане на скални блокове, г. общо хлъзгане на квазиеднороден напукан откос (Wyllie & Mah, 2004).

Хлъзгането може да се прояви както по една издържана или система колинеарни пукнатини (Фиг. 6-1а), така и по комбинация от пресичащи се пукнатини, определяща обща посока на движение на клинове или призматични блоковете към свободния откос (Фиг. 6-1б).

Преобръщането на скални блокове е процес, предизвикан от изместване на центъра на тежестта извън контурите на блока (Фиг. 6-1в). по посока на свободния откос. То често е съпроводено с процеси на хлъзгане по основата или по вертикалните стени на съседни блокове. (Фиг. 6-1в).

Статически посочените механизми се описват по схемите на блоково равновесие и взаимодействие.

б. Механизми, които не зависят съществено от съпротивленията на срязване по пукнатини. Тези механизми се проявяват в скални откоси със значителна и сравнително равномерна напуканост, които могат да се разглеждат като квазиеднородни „неблокови“ масиви (Фиг. 6-1г). Тяхната устойчивост се характеризира с движения по кръгово-цилиндрични или повърхнини с по-сложен характер, описвани най-често със съответните добре известни методи от земната механика (тези на Fellenius, Bishop, Janbu, Шахунянц, Фисенко и др.). Основно изискване според Hoek and Bray (1981) за такъв тип механизми е размерите на индивидуалния структурен блок да бъдат значително по-малки от обхвата на процеса на неустойчивост, като тяхното взаимно заклиняване практически не допринася към усреднената якост на срязване на масива. В този случай Hoek предлага използването на формулите на мащабния ефект (22) и (23), разгледани в т. 0.

Разбира се, горната подялба често пъти е относителна, тъй като в природата освен посочените „чисти“ механизми на разрушаване на откосите, много често се наблюдават и такива, със смесен характер, свързани с възникване на преходни зони между двата типа (Kvapil and Clews, 1979).

6.2 Методи на устойчивост

В съвременната литература и практика инженерните методи за оценка на устойчивостта на скални откоси могат да се представят в три групи.

6.2.1 Кинематични (стереографски) методи

Тези методи позволяват да се изследва посоката на движение на скалните блокове без да се отчитат големината, главно посоката на силите, които им въздействат. Те се основават на сравняване на пространствените характеристики на пукнатините и тези на откосите, като позволяват:

- определянето на кинематичните възможности и общия механизъм на движение на блоковете, определени от съвпадението или не на ориентацията тяхната ориентация (посока и наклон) с тази на откоса – хлъзгане или преобръщане;
- определянето на геометричния тип на опасните скални блокове – призми или пирамиди (блоково хлъзгане или клиново хлъзгане), включително и на т.н. ключови блокове;
- отчитане на влиянието на триене по пукнатините;
- отчитане влиянието на хидростатичните, сеизмичните и др. външни сили върху устойчивостта, чрез изместване на вектора на тежестта на блока.
- прилагане на статистически критерии за оценка на вероятността за загуба на устойчивост.

Тези методи се основават главно на построения върху диаграми на Шмидт (долна полусфера). Независимо, че тези методи са сравнително прости и използват основни структурни характеристики на масива, те имат редица недостатъци:

- те са инвариантни от масата на телата (коефициентът на устойчивост се изчислява като съотношение на бездименсионни ъглови функции);
- не позволява отчитането на влиянието на неравностите върху съпротивленията на срязване, зависещи от нормалните напрежения (напр. по Barton);
- пренебрегва се изцяло влиянието на свързаност по пукнатините (било като кохезия, било като якост на опън).

Поради това приложимостта на тези методи е основно за нуждите на предварителните анализи и като съпътстващи (подпомагащи) други типове решения по теорията за гранично равновесие, за ключовия блок и др.

6.2.2 Методи на гранично равновесие

Методът на гранично равновесие се използват отдавна в практиката по земна и скална механика за решаване на проблеми с устойчивостта. Той се свеждат до оценка на възможността за възникване на непрекъснато пластично течение по една определена проста или сложна повърхнина в масива, наречена повърхнина на хлъзгане. В началният момент на разрушаване по повърхнината трябва да бъдат изпълнени едновременно условията на статично равновесие и условието за достигане или надвишаване на определен якостен критерий от напреженията в масива. По отношение на якостните критерии, най-често употребяваният е този на Hock и Bray. Основен показател за количествена оценка на устойчивостта е т.н. “коефициент на устойчивост”, който в най-общия случай е съотношение между стойността на съпротивлението на масива по използвания якостен критерий и максималната стойност на напреженията, срещу които то противодейства.

Основната задача на метода на гранично равновесие е да се намери такава повърхнина на хлъзгане, за която коефициентът на устойчивост е минимален. Обикновено тази повърхнина се търси опитно или с вариационни изчисления.

Основните предимства на метода пред кинематичните методи са:

- представителност по отношение на геометрията и свойствата на масива, включително и по пукнатини;

- адаптивност и гъвкавост на решенията за различни механизми в двумерни и тримерни условия, както и при наличие на многопластова среда с различни показатели;
- позволява включване в схемите на външни въздействия от хидростатични, сеизмични и укрепващи сили и натоварвания;
- позволява параметричен вероятностен анализ по отношение на коефициента на устойчивост;
- съществува повече от 50-годишна практика по успешно прилагане на различни методи на граничното равновесие в скалната и земна механика.

6.2.3 Числени методи

С развитието на компютърните технологии през последните 10-15 години, числените методи добиват все по-голяма достъпност, като разширяват теоретичната си база и обхвата на своето приложение. В скалната и земна механика с най-широко използване имат метода на крайните елементи (МКЕ), методи на граничните (дискретните) елементи (МГЕ) и хибридни (смесени) методи на моделиране. В съвременната практика има разработени редица специализирани софтуерни продукти за оценка на устойчивостта на скални откоси, които, до голяма степен, са елиминирали недостатъците на стандартните числени методи и са адаптирани към свойствата на скалния масив, като отчитат параметричната якостния модел на Hoek-Brown, наличието на системна, неблагоприятно ориентирана напуканост, дилатантното поведение на срязване по пукнатини (Rockscience RS2, FLAC Slope), както и поведението на масива като структурна система, определена от взаимодействието между блокове и отделящи ги пукнатини (UDEEC - Universal Distinct Element Code).

6.3 Кинематични методи. Метод на Markland.

Метод на Markland (1972) е основен при решаване на задачи за блокова устойчивост. Той използва стереографски построения в мрежа на Шмид долна полусфера на геометричните елементи на откоса и пукнатинните групи в него. Общите схеми на структурно контролираните обрушвания на скални откоси са представени на

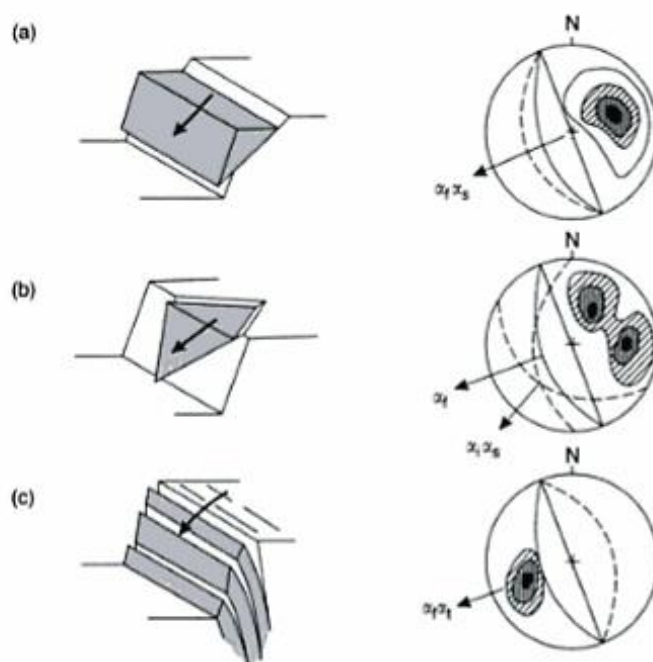
Фиг. 6-2. Тъй като те са определени от кинематичните възможности за хлъзгане, гравитационно извличане или преобръщане на блокове, оценката на възможността за проявлението им си основава на сравняване на посоките и наклоните на стъпалата и пукнатините в тях. Тук ще отбележим, че те се отнасят само за обрушвания, предизвикани от теглото.

По-детайлни анализи в настоящата работа са извършени с отчитане влиянието на якостта на срязване по контактните пукнатини, изразена чрез ъгъла на триене, като за различните видове обрушвания той се прилага по начините, показани на

Фиг. 6-2.

Хлъзгане по плоска повърхнина

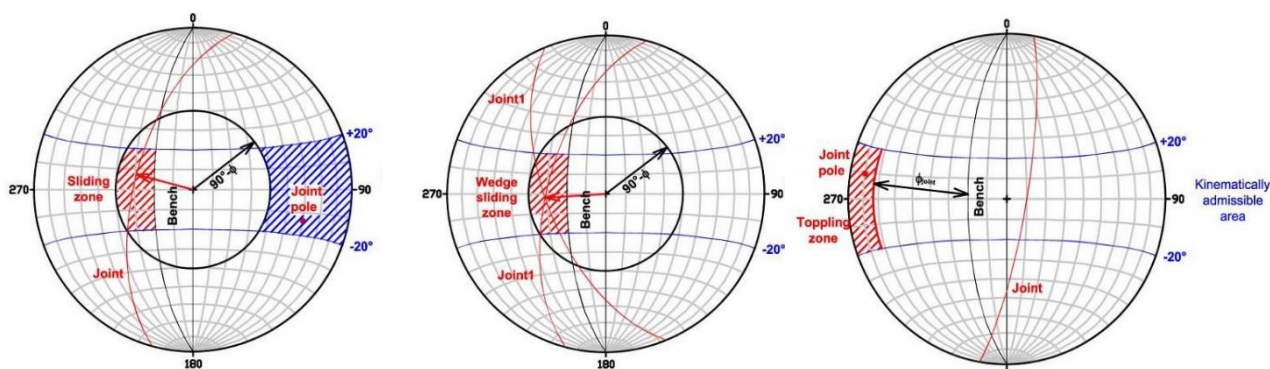
Хлъзгане по плоска повърхнина се очаква, когато векторът на затъване на пукнатината попадне в зоната, ограничена от окръжността на откоса и централна окръжност с диаметър $90^\circ - \phi_{\text{joint}}$. Странично тази зона е ограничена от двата малки кръга, ориентирани на ъгъл $\pm 10^\circ \div 20^\circ$ спрямо страната на равнината на откоса, където трябва да попадне и полюсът на съответната пукнатина.



Фиг. 6-2. Общи схеми на структурно контролирани обрушвания и съответните стереографски проекции на Schmidt (a) плоско хлъзгане, (b) клиново хлъзгане и (c) преобръщане.

Клиново хлъзгане

В този случай, стереометричните построения са на практика същите, като оценката се прави за пресечницата между двете пукнатини от основата на блока.



(Фиг. 6-3. Стереографски проекции съгласно метода на Markland за различни видове структурно контролирани обрушвания: (a) плоско хлъзгане, (b) клиново хлъзгане и (в) преобръщане.

Преобръщане

Преобръщане на блокове се очаква, когато полюсът на пукнатините попада в зона, ограничена от централните окръжности с радиуси 0° и $90^\circ - (\beta_{\text{slope}} + \phi_{\text{joint}})$, при запазване на същите ограничения от $\pm 20^\circ$ между посоките на склона и пукнатината.

6.4 Методи на Bishop и на Janbu

Методът на Bishop е достатъчно известен метод за оценка на устойчивостта на кръгово-цилиндрична повърхнина. Формулата за коефициента има следния вид:

$$(24) \quad F = \frac{\sum \left\{ [c_i b_i + (W_i - u_i b_i + \Delta X_i) \tan \phi_i] \frac{\sec \alpha_i}{1 + \tan \alpha_i \tan \phi_i / F} \right\}}{\sum W_i \sin \alpha_i}$$

Методът на Janbu също е достатъчно известен метод за оценка на устойчивостта по сложна начупена повърхнина на хлъзгане, като формулата за коефициента има следния вид:

$$(25) \quad F = \frac{\sum \left\{ [c_i b_i + (W_i - u_i b_i + \Delta X_i) \tan \phi_i] \frac{\sec^2 \alpha_i}{1 + \tan \alpha_i \tan \phi_i / F} \right\}}{\sum W_i \tan \alpha_i}$$

И в двата случая изразите спрямо коефициента на устойчивост са в неявна форма и се решават итерационно.

6.5 Програмен продукт FLAC Slope

Програмният продукт FLAC Slope на фирмата Itasca се основава на метода на крайните елементи за решаване на устойчивостта на откосите, включващи съвместно решаване на балансовите уравнения напрегнато и деформирано състояние, и конститутивните функции (модели на еластичност и пластичност, якостни критерии и др.). Dawson and Roth (1999) и Cala and Flisiak (2001) определят следните му предимства пред методите на гранично равновесие:

- не е необходимо изследване на предварително зададени повърхнини на хлъзгане;
- не се използват фиктивни параметри, като междупламелни сили;
- локални или общи повърхнини на хлъзгане или зони на вътрешно разрушаване се генерират в съответствие с условията, които ги пораждат;
- решението включва кинематична оценка за посока на преместванията в зависимост от направлението на небалансираните резултатни въздействия.

Програмата отчита допълнителното неблагоприятно влияние върху якостните свойства на масива на системна напуканост, чието западане е по посока на склона.

Определянето на коефициента на устойчивост става, чрез използване на метода на намаляване на якостта (SRT - Strength reduction technique), който се изразява в последователно редуциране на якостните параметри C_0 и ϕ_0 , както следва:

$$(26) \quad C_i = \frac{C_0}{F_i}$$

$$(27) \quad \phi_i = \arctg \left(\frac{\tan \phi_0}{F_i} \right).$$

Процедурата се повтаря за всеки цикъл на решение „i“ до достигане на минимално 0,5% отношение между некомпенсираната сила във всеки елемент и средната сила, упражнявана от съседните елементи. За разлика от конвенционалните методи на крайните елементи, програмата приема, че устойчивото пластично състояние също се приема за равновесно състояние. Това позволява да се определят векторите и интензивността на преместванията в пластичните зони в масива.

7 ХАРАКТЕРИСТИЧНИ ПОКАЗАТЕЛИ

При обработката на данните от полевите и лабораторни изследвания, е възприет подхода на Еврокод 7, за определяне на характеристикните стойности на отделните показатели, като са изчислени следните статистически показатели:

- Средно $\bar{X} = \frac{\sum x_i}{N}$
- Стандартно отклонение $SD = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$

Характеристичните (X_k) стойности на геотехническите показатели са определени по следния начин:

$$X_k = \bar{X} \pm k \times SD$$

Където k е коефициент, определян по следната формула:

$$k = t_\alpha \times \sqrt{\frac{1}{N}}$$

където t_α е t -разпределението за 90% двустранен доверителен интервал.

Доколкото горните формули са валидни за случаите на нормално разпределение на данните, действителното разпределение на показателите е тествано визуално на посторените хистограми. По същия начин е оценявана и възможността за лог-нормално разпределение, като за тези случаи статистиките са оценявани по горните формули за лотаритмичните стойности на аргумента X ($\ln X$).

Ъгълът на вътрешно триене и кохезията са изчислени съгласно метода на най-малките квадрати.

За случаите на ограничен брой данни и/или значително разсейване, водещи до неприемливи стойности на характеристикните показатели (обикновено извън обхвата на лабораторно определените), стойностите за ϕ_k и C_k са определени като независими показатели.

Хистограмите на разпределение, горните и долните характеристикни стойности са изчислени с помощта на EXCEL.

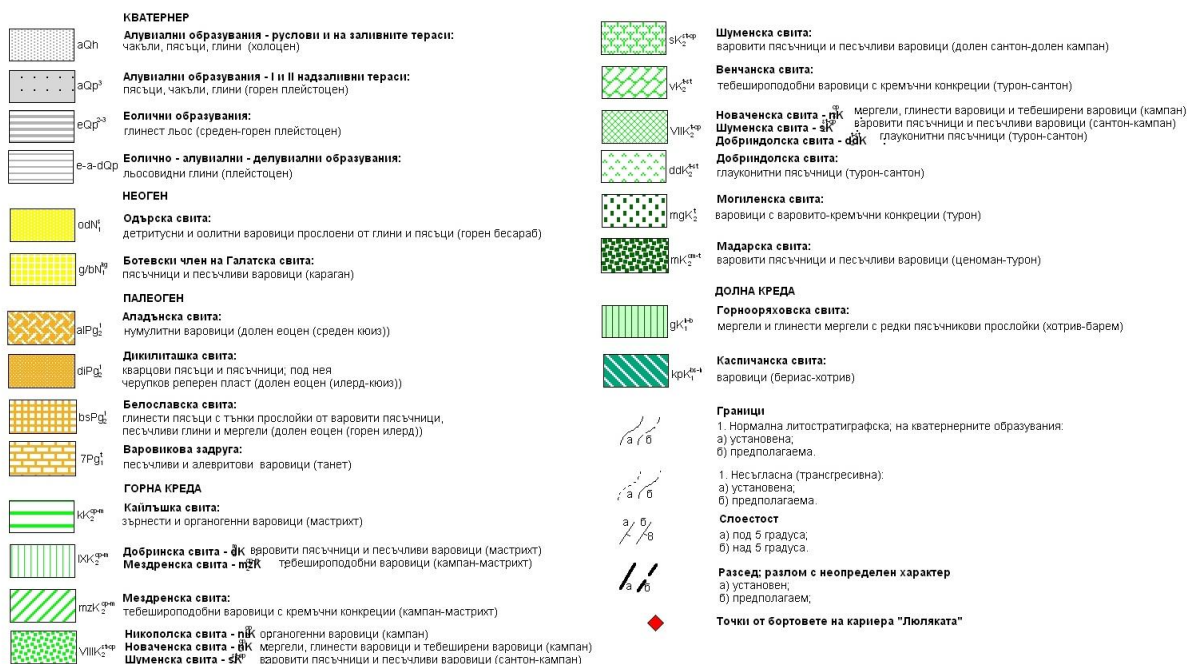
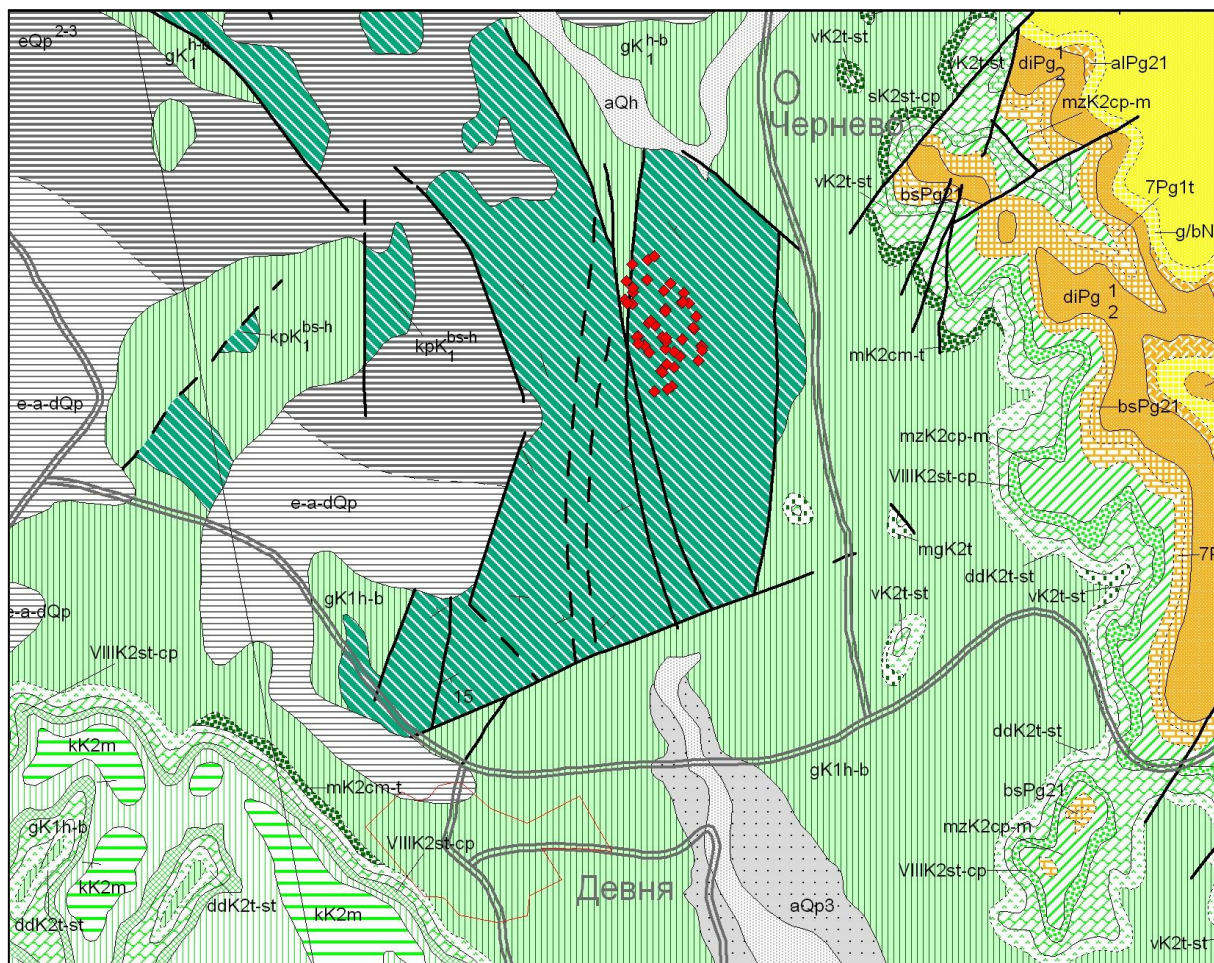
8 ОЦЕНКА НА УСТОЙЧИВОСТТА НА КАРИЕРА „ЛЮЛЯКАТА” – ДЕВНЯ

Основната цел на оценката на устойчивостта на кариера „Люляката” и да се изясни връзката между структурната нарушеност на скалния масив и структурно контролираната устойчивост на откосите на единични или група стъпала при различната ориентация на бордовете на кариерата.

8.1 Геологоструктурно местоположение

В геолого-структурно отношение кариерата е развита в долнокредни (бериас-хотривски) варовици на Каспичанската свита, разкриваща се в ядката на Хитринско-Девненския вал на Северобългарското подуване, представляващо част от Мизийската платформа (

Фиг. 8-1)



Фиг. 8-1. Геоложка карта на района на кариера „Люляката“ – Девня.

8.1.1 Етапи на теренните изследвания

Теренните инженерногеоложките изследвания се провеждат в три етапа:

- Първи етап – рекогносцировка на бордовете на кариерата с цел определяне на представителни разкрития („измервателни станции“) за извършване на геологоструктурните и инженерногеоложките изследвания. В резултат на това са определени 23 бр. измервателни станции, равномерно разпределени по контура на кариерата (**Error! Reference source not found.**).
- Втори етап – геологоструктурна фотодокументация и инженерногеоложки измервания на характерни точки. Полевата документация включва заснемане на части от бордовете по възможност в две неуспоредни сечения, измерване ориентировката на пукнатинните групи, определяне гъстотата на пукнатинните групи с оглед изясняване блоковия модел на масива, определяне състоянието на стените на пукнатините и измерване на твърдостта на запълнителя с чук Schmidt тип L.
- Трети етап – картиране на главните разломни структури. Основните критерии за разпознаване на разломните структури са разместване на характерни стратиграфски нива (пластове), тектонска глина по пукнатинните (разривни) структури, тектонски огледала (харниши) с бразди на триене.

8.1.2 Резултати от геологоструктурното картиране

По-голямата част от кариерата е заета от органогенните и микритни варовици на Каспичанската свита. Подложката ѝ не се разкрива на повърхността. С рязък литоложки контакт тя се покрива от мергелите на Горнооряховската свита. Последната е запазена в югоизточната част на площта, главно в една дъговидна грабенова структура със стъпаловиден характер. Малки фрагменти от свитата са запазени и в оградните блокове. Видимата вертикална амплитуда на потъване е над 25 m.

Освен оградните разломи на грабеновата структура, множество разломи бяха установени и в откосите на кариерата, в Каспичанската свита. Пространствено тези разломи могат да се обединят в две групи: субмеридионални (С-Ю) и субекваториални (И-З). Първата група разломи трябва да се схваща като резултат от движенията по регионалната Венелин-Толбухинска дислокация. Основно те са ясно маркирана кинематика, представена от наличието на ясни вертикални амплитуди от 1-2 m, наличието на тектонски глини и харниши по тях.

Втората група разломи (субекваториалните) са субвертикални, но с неизяснена кинематика, тъй-като се маркират само от тектонска глина.

Слоестостта в Каспичанската свита е много ясно изразена. Тя е субхоризонтална ($5^{\circ} \div 28^{\circ}$), като страната ѝ варира от СЗ до ЮИ, което е характерно за платформените куполовидни структури. В заключение може да се каже, че Каспичанската свита в рамките на кариерата е разбита от множество разломи, но с малка амплитуда.

8.2 Резултати от геологоструктурната документация

Извършените изследвания показват, че във варовиците на Каспичанската свита, е развита много добре една ортогонална пукнатинна система, включваща

една субхоризонтална и две субвертикални пукнатинни групи. Пукнатините от тези групи имат систематичен характер и са ориентирани закономерно в пространството. В отделни точки са развити и несистематични пукнатини, но те имат локален характер и значение.

Систематичните пукнатинни групи имат следните характеристики:

- j_1 е субхоризонтална (полегата) и съвпада със слоестостта ss. Тази група (=ss) е полегата ($5^\circ \pm 28^\circ$), като в отделните точки потъва на СЗ, СИ, И и ЮИ. Генералната посока на потъване на тази група е на североизток (55/12).
- j_2 е субмеридионална и субвертикална. Посоката ѝ варира от северозападна до североизточна, а наклоните ѝ са около 90° , като варират в двете противоположни посоки, дори и в една и съща точка.
- j_3 е субекваториална и субвертикална. Посоката ѝ варира от югозападна до северозападна, а наклонът е в двете посоки, като преобладава южният. Статистическата ѝ ориентировка, изведена за всички пукнатини в кариерата, е 183/83.

Ориентировката на двете субвертикални пукнатинни групи j_2 и j_3 съвпада и с ориентировката на двете основни разломни групи. Останалите пукнатини, документираны в отделните точки, са несистематични и имат случаен (локален) характер. Те са използвани при определяне на блоковия модел в конкретните разкрития (точки). Закономерната ориентировка на трите ортогонални пукнатинни групи дава основание да се предположи, че те са свързани с глобалната ортогонална разривна мрежа, съществувала в края на ранната креда, по време на австрийските деформации, проявени на юг от Мизийската плоча в Балканидите.

8.3 Пукнатинен блоков модел, ориентировка на бордовете на кариерата

При разработването на кариерата много удачно е използван пукнатинният блоков модел и по-точно ориентировката на главните разривни нарушения. Шлицовете на стъпалата са прокарани по j_2 (т.е. със север-южна посока), а фронталните им части – по j_3 (т.е. с изток-западна посока). В голяма част от кариерата, наклонът на бордовете съвпада с наклона на j_2 или j_3 . В отделни случаи обаче пукнатинната група потъва срещу наклона на борда, като се образуват висящи блокове и корнизи. Варирането на пукнатините от една група варират, като създават опасни клинове. Освен това, освобождаването на големи пространства от скалния масив води до неговото разтоварване, а то от своя страна предизвиква гравитационно отваряне и флексурно огъване на блокове по посока на свободното пространство.

8.4 Класификация на скалния масив

Общите условия на скалния масив са определени съгласно следните класификационни системи:

- Rock Mass Rating (RMR₈₉)
- Slope Mass Rating (SMR)
- Geological Strength Index (GSI).

8.4.1 Класификация съгласно RMR

Класификацията по Rock Mass Rating е извършена съгласно основната скала съгласно показателя RMR₈₉ на Bieniawski с отчитане на корекцията за влиянието на ориентацията на пукнатините, съгласно представената на Фиг. 3-2.

За нуждите на класификацията SMR, базовата стойност на RMR_{76} е определена като (Hoek et al, 1997):

$$(28) \quad RMR_{76} = (\text{basic } RMR_{89}) - 5$$

За оценка на отделните разкрития са използвани следните степени и точкови оценки.

Якост на ненарушената скала

Якостта на натиск на варовиците е в обхвата 4.3÷81 МПа при средна стойност 33 МПа, съответстваща на **оценка 4**.

Показателят RQD

Тъй като за показателят RQD липсват данни от предишни проучвания стойностите за него са определени съгласно посочената в т. корелационна зависимост на Palmstrom (1982) между RQD и показателя J_v (брой на пукнатините в 1 кубичен метър от масива) по формула (2). Стойностите за гъстотата на пукнатините за група „i“ S_i за всяка точка на наблюдение са представени в Приложение А.2. Изчислените стойности за RQD са ограничени до 100%.

Разстояние между пукнатините

Средното разстояние между пукнатините за всяка точка е изчислено чрез усредняване на разстоянията, измерени за всяка пукнатинна система (Приложение А.2).

Състояние на пукнатините

По данни от полевата картировка на всички точки е прието, че грапавостта по горната скала се определя като **много грапава до грапава с оценка 5**.

Запълнител

По време на полевите работи се установи за цялата кариера, че пукнатините на практика са без запълнител или с много тънък (<1 mm) запълнител от зърнест материал (дребен пясък и скално брашно). За всички точки този показател е оценен **средно на 5**.

Отваряне на пукнатините

Средният размер на отвореността на пукнатините е оценена на до 5 mm, а за този показател е приета **средна оценка от 1**.

Изветряне на стените

За всички точки на изследване установените степени на изветряне на стените на пукнатините са оценени като „неизветрели“ до „слабо изветрели“ **със средна оценка от 5**.

Подземни води

Полевите наблюдения показаха, че те на практика са сухи, но с известно окисно оцветяване и натрупани в тях дребнозърнести материали. Омокряне е установено в зоните на карстовите празнини. По тази причина, хидрогеоложките условия общо за всички точки са оценени като **„влажни“ с оценка 10**.

Ориентация на пукнатините

В зависимост от резултатите от анализа на устойчивостта по методиката на Markland представена по-долу (т. 8.9), за точките без установена опасност от обрушване е използвана оценката „благоприятна“ съответстваща на (-5) точки, а за тези с опасност от обрушване - оценка „средна“, съответстваща на (-25).

8.4.2 Класификация съгласно SMR и GSI

Резултатите от класификацията на скалния масив по отделните системи, получени за точките на наблюдение в кариерата са представени в Табл. 8-1.

Сравняването на средните стойности по отделните класификационни показатели позволява да се направят следните заключения.

Средната стойност на основния показател RMR_{89} ($RMR_{89}=66$) съответства на Клас II (Class II) на скалите (**Error! Reference source not found.**) - много добро качество на скалите и безопасен откос на стъпалата от около 65° , което е близко и малко по-ниско от съществуващите откоси на стъпалата в кариерата от около 70° .

Табл. 8-1. Усреднени резултати за показателите за класификация на скалния масив по различните методи.

Показател	Система на класификация				
	Основен RMR_{89}	Коригиран RMR_{89}	Основен RMR_{76}	SMR	GSI
AVE.	66	55	61	55	63
min	60	40	55	26	58
max	70	65	65	65	77

За точките с неблагоприятна устойчивост, намаляването е с 25 степени, което значително намалява качеството на масива до „средно“ и определя безопасен наклон на откосите от 55° . Откоси с такива наклони не бяха установени при настоящите работи дори в най-нарушените части на кариерата, но са близки до безопасните ъгли, определени по методиката на Markland за структурната устойчивост и съответстващи на якостта на срязване по пукнатините, разгледани по-долу.

Стойността на показателя SMR се изменя в границите от 41 до 65, със средна стойност $SMR=55$. Съгласно описанието на качеството на скалния масив по Romana (1985) (Табл. 3-1) тези стойности съответстват на Клас III „нормални“ условия на скалните откоси, характеризиращи се с частична устойчивост. Основните типове обрушване, които могат да се очакват за този клас са:

- единични (големи) хлъзгания по една повърхнина (пукнатина) – При полевите наблюдения, такива не са установени, тъй като не се установяват пукнатини, които да излизат в равнината на откосите. Подобни обрушвания, обаче, се наблюдават при точки 319, 320, 322, 327 и 345, където пукнатините от системата j_2 са почти успоредни на борда и са с същия наклон.
- „множество клинови хлъзгания“ – Такива са наблюдавани при полевата картировка в точки 323, 325, 330, 333, 334, 335 и 339, където откосите на стъпалата са ориентирани косо на двете основни системи пукнатини j_2 и j_3 . Клиновете са с издължена форма, малки напречни сечения (до $1-4\text{ m}^2$) и много стръмни пресечници ва основите, излизащи в равнината на откосите..
- „незначителни преобръщания (toppling failures)“ – Такива са наблюдавани там, където пукнатините са с ориентация успоредна на откоса и залягат стръмно и обратно в (точки 317, 324, 325, 333 и 337) или наличие на разлом (т. 338). Такъв процес е установен и при точка 335, където бордът на стъпалото е изпъкнал по посока навътре към кариерата и теглото на скалите е предизвикало флексурно огъване (toppling flexuring) по посока на пукнатините от система j_3 .

Показателят GSI се изменя в граници от 55 до 87 при следна стойност $GSI=67$. Най-общо това съответства на „добро“ (good) качество на скалите.

8.5 Якост на скалния масив

Якостта на скалния масив е важен параметър, използван при

стабилитетните изчисления. В зависимост от механизма и обхвата на обрушванията те мога да бъдат следните в кариерата:

- Структурно зависими обрушвания на блокове по пукнатини в стъпалата (при плоско хлъзгане, клиново хлъзгане и преобръщане).
- Обща загуба на устойчивост на скалния масив по борда на кариерата.

От тази гледна точка е необходимо да се определят два типа якост на срязване: якост на срязване по пукнатините и обща якост на срязване на скалния масив.

8.6 Якост на срязване по пукнатините

Якостта на срязване по пукнатините е определена по формулата на Barton (1976) за определяне на триенето по тях – уравнение (20).

8.6.1 Коефициент на грапавост на пукнатините (JRC)

Коефициентът на грапавост на пукнатините се определя на базата на визуално сравняване със стандартна скала на Barton et al, 2007 (Фиг. 5-6) със профилите на грапавост на стените на пукнатините документиран на полето. Усреднените стойности за JRC за различните системи пукнатини и точка на наблюдение са представени в следващата Табл. 8-2.

Табл. 8-2. Средни стойности за JRC за различните групи пукнатини и точки на наблюдение.

	JRC за пукнатинна система					Средно
	j ₁ =ss	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	
Ave.	11	13	10	7	14	12
Max.	15	18	15	7	14	18
Min.	7	9	8	7	14	7

Определените за показателя JRC характеристични стойности са:

- $JRC_{ave} = 11,9$
- $JRC_{k-} = 10,7$.
- $JRC_{k+} = 13,1$.

8.6.2 Якост на стените на пукнатините (JCS)

Якостта на стените на пукнатините е определена полево с използване на чук на Schmidt тип L. Медианната стойност на горните данни е $R_{med} = 27$, като за всички стойности над нея са изчислени стойностите за показателя JCS с използване на формула (21) за стойност на обемното тегло $\gamma = 23,5 \text{ kN/m}^3$. Получените характеристични стойности на показателя са следните:

- $JCS_{ave} = 49,8 \text{ MPa}$
- $JCS_{k-} = 47,5 \text{ MPa}$
- $JCS_{k+} = 52,1 \text{ MPa}$.

8.6.3 Ъгъл на триене по пукнатини

За определянето на ъгъла на вътрешно триене по пукнатините ϕ_{joint} в масива посочената по-горе формула **Error! Reference source not found.**, е частично преработена, като означенията остават същите:

$$(28) \quad \phi_{joint(act)} = \phi_b + JRC_n \log_{10} \left(\frac{JCS_n}{\sigma_n} \right)$$

Типичните стойности за варовик, съгласно Barton и Choubey (

Табл. 5-1) са $\phi_b = 30^\circ - 37^\circ$. При настоящото изследване е приета стойността $\phi_b = 33^\circ$.

Оценката на мащабния ефект за показателите JCS и JRC е извършена по формули (22) и (23), като са използвани следните стойности:

- характеристичните стойности на участващите във формулата параметри са $JRC_0 = JRC_K = 11$ и $JCS_0 = JCS_K = 47,5$ MPa
- $L_0 = 0,4$ м и максимална стойност на $L_n = 10,0$ м,

при което за стойностите в масива се получава $JRC_n = 5,4$ и $JCS_n = 16,9$ MPa.

В изчисленията е приета минимална стойност за $\sigma_n = 50$ kPa, която съответства на средна дебелина на блока от 2 м спрямо пукнатината на хлъзгане в основата му. Това съответства и на горната граница на разстоянията между пукнатините в кариерата и на единичните размери на скалните блокове в масива.

Определената стойност за ъгъла на триене по пукнатините е:

$$\phi_{joint(act)} = 33 + 5,4 \log_{10} \left(\frac{1690}{50} \right) = 46,7^\circ \approx 47^\circ$$

8.7 Якост на скалния масив

Якостта на скалния масив е определена съгласно якостния критерий на Hoek-Brown (2002). Изчисленията за якостната диаграма са направени с програмата RockLab1.0, където кохезията и ъгъла на вътрешно триене за определени с използването на следните параметри:

- Якост на едноосов натиск на скалата $\sigma_{ci} = 42$ MPa
- GSI (средно) = 63
- използвана е стойност на показателя $m_i = 10$, съгласно препоръчителните стойности на Marinos and Hoek (2000)
- Показател на нарушеност $D = 1,0$
- Максимално нормално напрежение в масива, определено за максимална височина на общия откос на кариерата $H = 110$ m.

Резултатите за якостта на скалния масив са получени както:

- Ъгъл на вътрешно триене $\phi = 33,56^\circ$
- Кохезия $C = 0,482$ MPa.

Тези якостни показатели могат да се определят и по базовата стойност за RMR_{89} по следните формули Bieniawski (1984):

- Ъгъл на вътрешно триене $\phi = 0,5RMR_{89} + 5 = 0,5 \times 66 + 5 = 38^\circ$
- Кохезия $C = 5RMR_{89} = 5 \times 66 = 330$ kPa = 0,33 MPa.

Получените стойности са със сравними величини и могат да бъдат използвани при бъдещи оценки за обща устойчивост на бордовете при бъдещо проектиране на окончателния контур на кариерата.

8.8 Оценка на структурно контролираната устойчивост на бордовете (метод на Markland)

Във връзка с получените до тук резултати от геоложкото картиране и общите принципи за оценка на устойчивостта на кариерата, структурно контролираните процеси на обрушване включват моделите на линейно хлъзгане, клиново хлъзгане и преобръщане. Тези модели са приложени по отношение устойчивостта на откосите на стъпалата.

Оценките за направени за всички точки на наблюдение съгласно моделите на плоско, клиново хлъзгане и преобръщане, характеризирани в т. 6.3. При тях е използвана на получената средна стойност за ъгъла на триене по пукнатини $\phi_{\text{joint(act.)}} = 46^\circ$. В следващата **Error! Reference source not found.** и на Фиг. 8-2 са представени резултатите за 9-те точки с установените потенциални типове обрушвания.

Табл. 8-3. Резултати от оценка на устойчивостта за структурно контролираните обрушвания.

Точка	Модел на обрушване		
	Плоско	Клиново	Преобръщане
316	не	не	да
320	да	не	не
321	не	не	да
324	не	не	да
326	не	не	да*
330	не	да	не
336	да	не	да
337	да	не	не
338	не	да	да

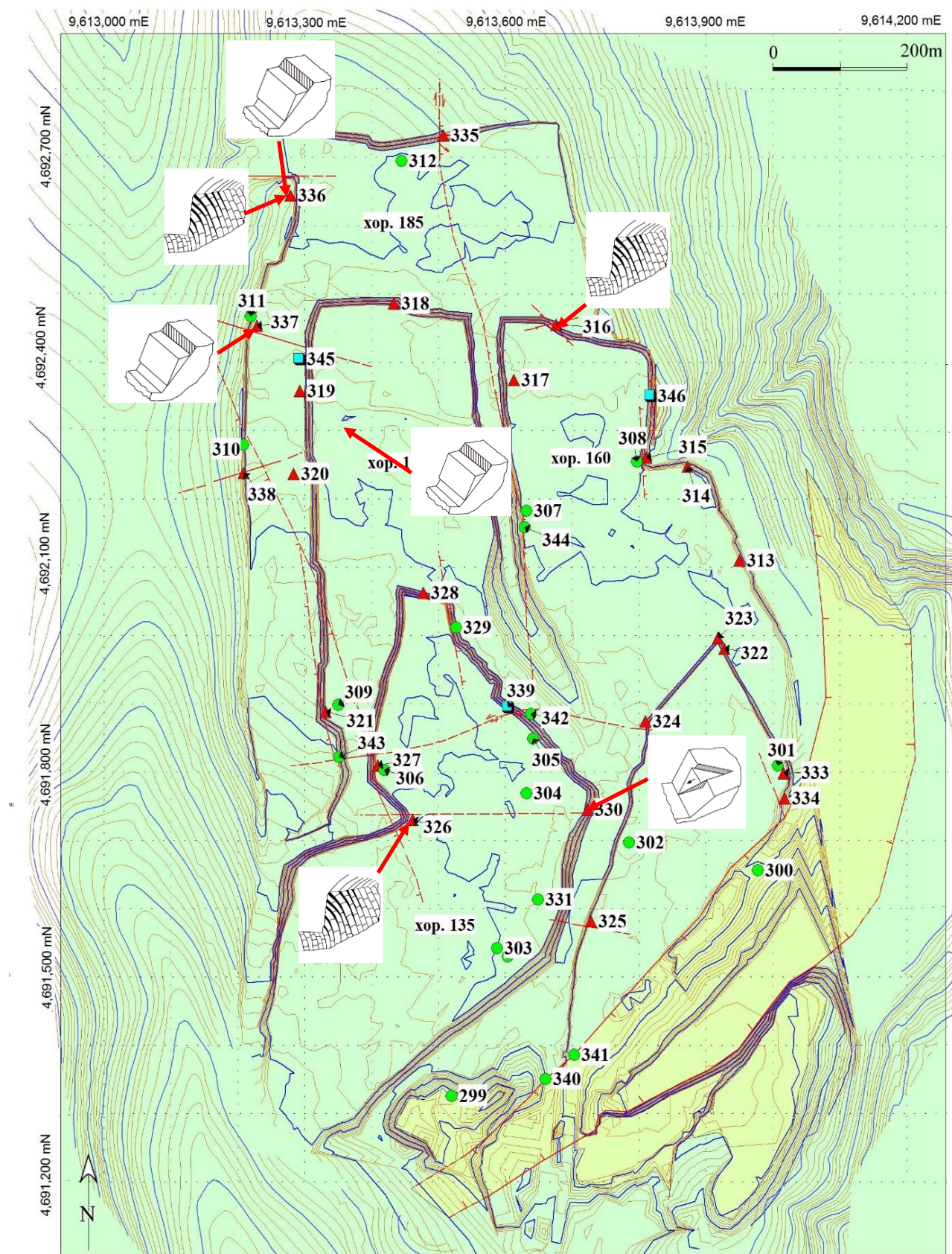
Забележка: *Отнася се изложение на стъпалото на юг.

8.9 Анализ на получените резултати

Направеното проучване и анализът на получените резултати ни дават основание да се направят следните изводи относно състоянието на откосите в кариерата:

- Настоящото състояние на откосите в кариерата е добро, без да се наблюдават съществени структурно контролирани обрушвания. Това се дължи на удачното използване на пукнатинният блоков модел и по-точно ориентировката на главните разривни нарушения (пукнатини и разломи), като откосите на стъпалата са прокарани по j_2 (т.е. със север-южна посока) и по j_3 (т.е. с изток-западна посока).
- В отделни случаи обаче пукнатинната група потъва срещу наклона на борда, като се образуват висящи блокове и корниз.
- Вариането пукнатините от една група по посока и наклон опасни клинове.
- В най-голяма степен от структурно контролирани обрушвания са застрашени, тези части от стъпалата, при които са оформени изпъкнали към кариерата клинове, като вероятността за тяхното развитие нараства с времето на тяхното престояване.
- Кинематично възможните нарушения от типа на плоско хлъзгане по съществуващите в масива пукнатини с наклони на пукнатините от 60° - 75° и клиново хлъзгане по пресечници с наклони 50° - 70° .

- с цел подобряване на структурно контролираната устойчивост на бордовете на кариерата в опасните участъци, се препоръчва откосите да се оформят под наклони $60^{\circ} \div 65^{\circ}$, което ще елиминира голяма част от опасностите за обрушвания. Тези стойности се корелират с препоръчаните съгласно класификацията по показателя RMR_{89} .



Фиг. 8-2. Ситуация на кариерата с точките на установена потенциална структурна неустойчивост на бордовете.

9 УСТОЙЧИВОСТ НА ЮГОИЗТОЧНИЯ БОРД НА РУДНИК „АСАРЕЛ“

Основната цел на оценка на устойчивостта е прилагане на посочените по-горе методи за определяне свойствата на и устойчивостта на скалния масив и скалните откоси за оразмеряване на проектни устойчиви откоси на югоизточния борд на рудник „Асарел“, където е разположен трошачно-транспортния комплекс при последователно удълбочаване на рудника от кота 630 до коти 550 и 450.

9.1 Геоложки условия

Рудник „Асарел“ се намира в обхвата на Панагюрската вулканогенна ивица. Находището е изградено от палеозойски гранитоиди: биотитови и левкократни гранити; горнокредни ефузивни скали: андезити, лавобрекчи и туфи, субвулкански скали: диорит-порфири, кварцдиорит-порфири и гранодиорит порфири. Скалите са хидротермално променени и превърнати в метасоматити. В минералния състав на същите са включени: кварц, серицит, каолинит, монтморилонит, хлорит, епидот, алунит, диаспор и др. (Фиг. 9-1, Попов и др., 2012).

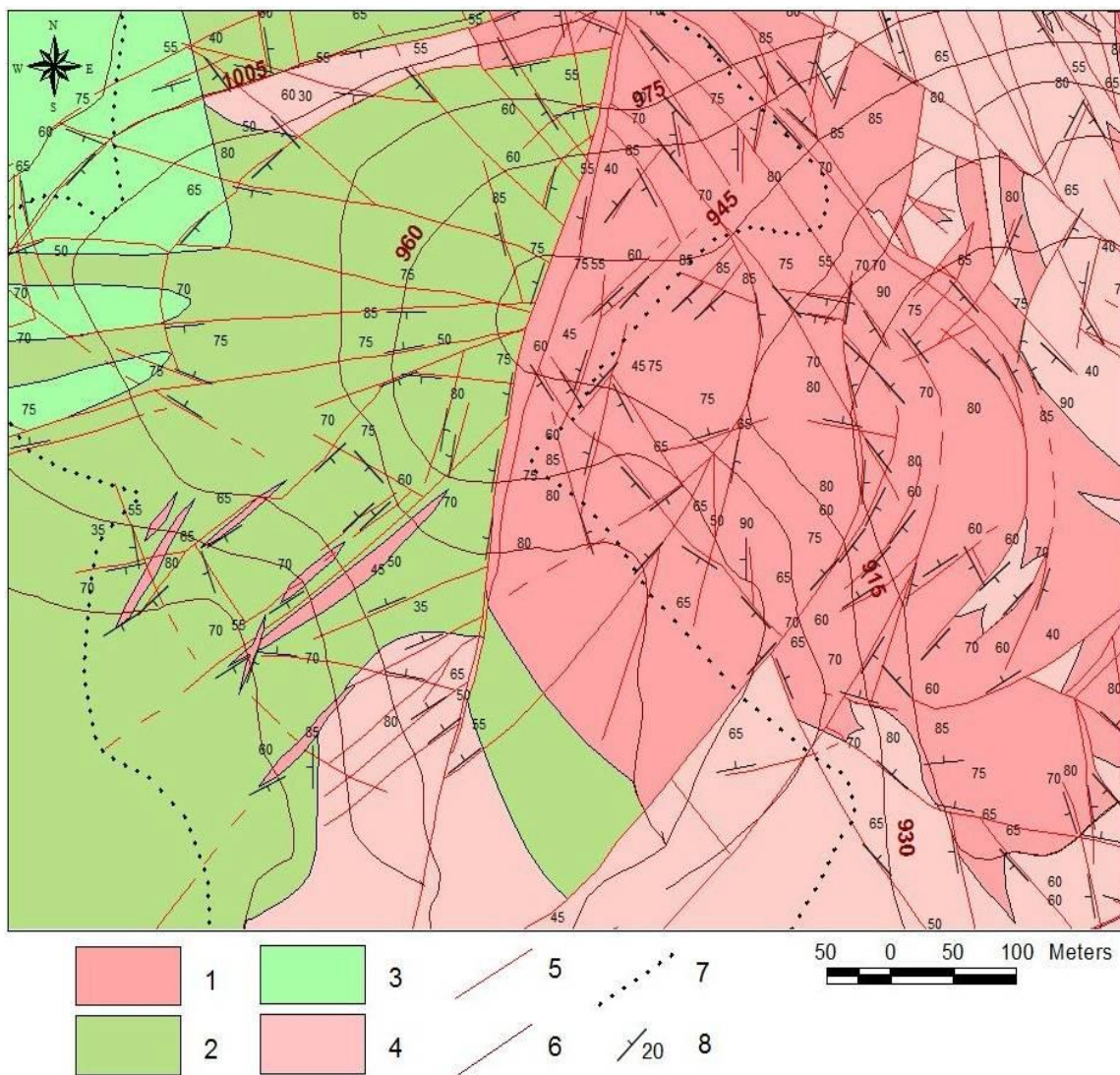
В зависимост от степента на метасоматизъм и количественото съотношение на скалообразуващите минерали, са разграничени следните видове метасоматити: пропицити, аргилизити, алунит-диаспорови и серицитови вторични кварцити.

9.2 Структурна картировка на участъка на югоизточния борд

9.2.1 Етапи на теренните изследвания

Теренните изследвания се проведеха на два етапа, както следва:

- първи етап – рекогностировка на достъпните и безопасни за работа изработки в обхвата на югозападния участък на рудник „Асарел“ и определяне на представителни за скалния масив.
- втори етап – геологоструктурна документация и геомеханични измервания в набелязаните за това станции. Теренната документация включва заснемане на разкритието, измерване на пространствените елементи, издържаност, отвореност, наличие, вид и якост на запълнителя и оводненост на пукнатините, както и отстоянието между тях и тяхната гъстота с оглед изясняване на блоковия модел на масива. Определяни са: (1) състоянието на стените на пукнатините, тяхната грапавост, степента на тяхната изветрялост и тази на скалния масив; (2) гъстота на пукнатините е извършвано нормално на тяхното разпространение, като е определян броят им на линеен метър.



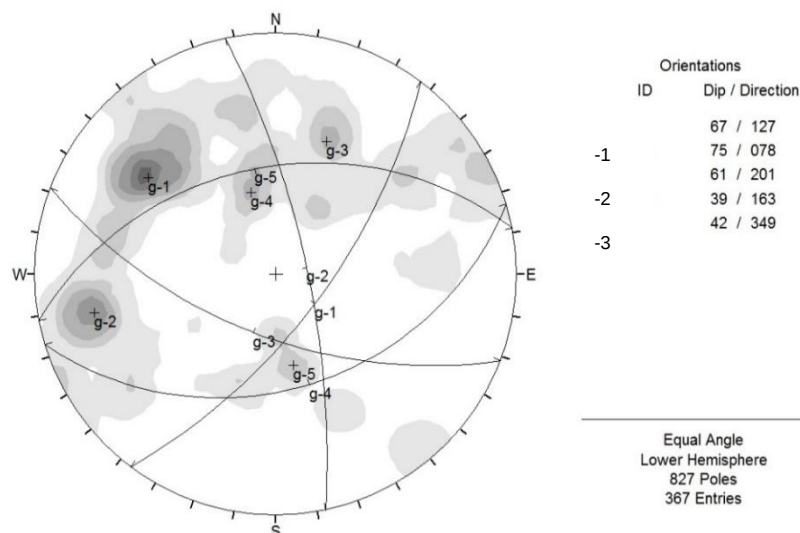
Фиг. 9-1. Геолого-структурна карта на находище Асарел в границите на открития рудник (Попов и др., 2012). 1 - диоритови порфириди, 2 - гърлови андезити, 3 – ефузивни андезити, 4 – палеозойски гранити, 5 – разломи, 6 – минни хоризонти, 7 – контур на рудното тяло, 8 – елементи на залягане.

9.2.2 Структурна нарушеност на масива

Обработката на структурните данни и анализът на получените резултати по станции и профилни линии изяви отчетливо по-голямата значимост на типа на първичната скала при формиране на структурната нарушеност на масива спрямо тази на типа промени наложени върху него.

9.2.2.1 Палеозойски гранитоиди

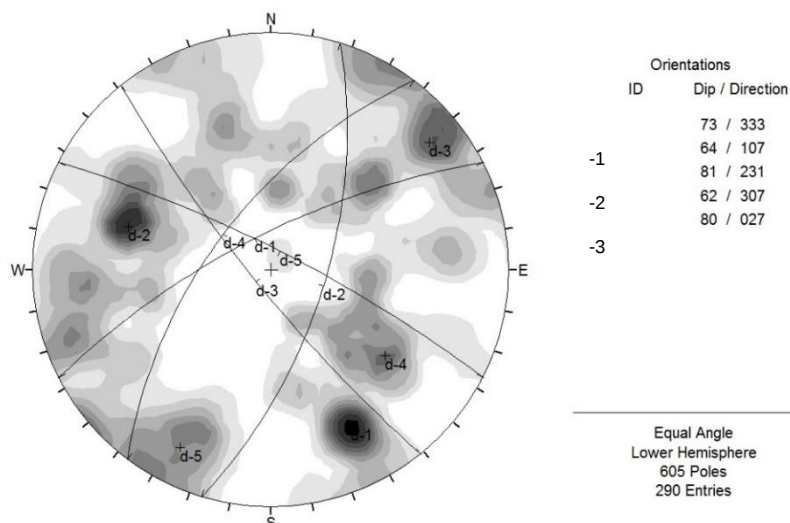
В разработените в палеозойски гранитоиди 7 бр. измервателни станции са изучени и документирани общо 827 бр. пукнатини. Резултатите от тяхната статистическа обработка са представени на Фиг. 9-2.



Фиг. 9-2. Контурна диаграма (долна хемисфера) на изявените в палеозойските гранитоиди пукнатинни групи (g-1÷5) в изследваната площ. Усреднените пространствени елементи на обособените пукнатинни групи са дадени в градуси. Достигната максимална плътност в центровете на тежестта на отделените групи: (а) над 5 % - група g-1; (б) 3-5 % - групи g-2÷4; (в) под 3 % - група g-5.

9.2.2.2 Гранодиорити

В наличните в гранодиоритите разкрития в изследваната площ са разработените 5 бр. измервателни станции, в които са документирани общо 605 бр. пукнатини. Резултатите от тяхната статистическа обработка са представени на Фиг. 9-3.



Фиг. 9-3. Контурна диаграма (долна хемисфера) на изявените в гранодиоритите пукнатинни групи (d-1÷5) в изследваната площ. Усреднените пространствени елементи на обособените пукнатинни групи са дадени в градуси. Достигната максимална плътност в центровете на тежестта на отделените групи: (а) над 5 % - група g-1÷2; (б) 3-5 % - групи g-3÷4; (в) под 3 % - група g-5.

9.2.2.3 Вулканити

В изучената площ е изучено само едно разкритие на вулканити – Измервателна станция № 12, в което са документирани общо 119 бр. пукнатини.

Освен присъствието на основните пукнатинни групи характерни за измервателните станции, разработени в диоритпорфирити – d-1/4, се установява и две отличаващи се от тази група с усреднени пространствени елементи 150°/66° (v-1) и 357°/27° (v-2). Параметрите на втората група са доста близки до пукнатинна група g-5.

9.3 Определяне на параметрите на структурна нарушеност на масива

9.3.1 Разстояние между пукнатините

В настоящите изследвания, по време на теренната работа са измервани отстоянията между всички пукнатини от всяка пукнатинна група поотделно. Направена е статистическа обработка на резултатите, като са изключени нарушения причинени от взривни работи. Данните за отстоянията между пукнатините по пукнатинни групи за типовете скали са представени в Табл. 9-1 и Табл. 9-2.

1.1.1 Обемен показател за напукаността (J_v)

За целите на настоящите изследвания обеминият индекс на напукаността J_v е изчислен по посочената по-горе формула **Error! Reference source not found.**, където са взети предвид и случайните пукнатини за всяка станция поотделно. Обобщените резултати за J_v по станции и скални разновидности са са обобщени в Табл. 9-3 и

Табл. 9-4.

Табл. 9-1. Средни представителни отстояния в метри между пукнатините в изявените палеозойски гранитоиди пукнатинни групи (g-1÷5).

Пукнатинна група	Номер на измервателната станция						
	1	4	5	6	9	11	13
g-1	0.36	-	-	-	0.24	0.10	0.20
g-2	0.28	0.19	0.16	0.37	0.22	0.17	0.06
g-3	-	-	0.15	0.28	0.32	-	0.27
g-4	13	0.30	0.19	-	-	0.17	-
g-5	0.53	0.23	0.24	0.44	-	0.25	-

Табл. 9-2. Средни представителни отстояния в метри между пукнатините в изявените в гранодиоритите пукнатинни групи (d-1÷5).

Пукнатинна група	Номер на измервателната станция				
	2	3	7	8	10
d-1	-	0.17	-	0.15	-
d-2	0.16	-	0.26	-	0.20
d-3	0.29	0.23	0.20	0.26	0.11

d-4	0.26	0.34	0.38	0.33	0.20
d-5	-	-	-	-	0.13

Табл. 9-3. Резултати от изчисленията на обемен индекс на напукаността J_v (средно представително отстояние между пукнатините в м) в гранодиоритите.

Пукнатинна група		Номер на измервателната станция				
		2	3	7	8	10
	d-1	-	0.17	-	0.15	-
	d-2	0.16	-	0.26	-	0.20
	d-3	0.29	0.23	0.20	0.26	0.11
	d-4	0.26	0.34	0.38	0.33	0.20
	d-5	-	-	-	-	0.13
J_v	стойност	14.8	14.2	12.2	15.5	27.9
	описание	висока	висока	висока	висока	висока

Табл. 9-4. Резултати от изчисленията на обемен индекс на напукаността J_v (средно представително отстояние между пукнатините в м) в палеозойските гранодиорити.

Пукнатинна група		Номер на измервателната станция						
		1	4	5	6	9	11	13
	g-1	0.36	-	-	-	0.24	0.10	0.20
	g-2	0.28	0.19	0.16	0.37	0.22	0.17	0.06
	g-3	-	-	0.15	0.28	0.32	-	0.27
	g-4	13	0.30	0.19	-	-	0.17	-
	g-5	0.53	0.23	0.24	0.44	-	0.25	-
J_v	стойност	17.0	13.7	22.9	9.3	13.6	27.1	26.1
	описание	висока	висока	висока	Умерена/висока	висока	висока	висока

9.3.2 Определяне на GSI

Класифицирането на изследвания участък от рудник „Асарел“ по показателя GSI е извършен по модифицираната от Sonmez and Ulusay (2002) с помощта на показателите SCR и SR. Включените в тях показатели на грапавостта R_f , изветрянето R_w и запълнителя в пукнатините R_f са оценени както следва.

Грапавост

Грапавостта е определена скала на Bieniawski (1976) като по данните от полевата картировка на всички точки е прието, че по горната скала се определя като „много грапава до грапава“ с оценка 5.

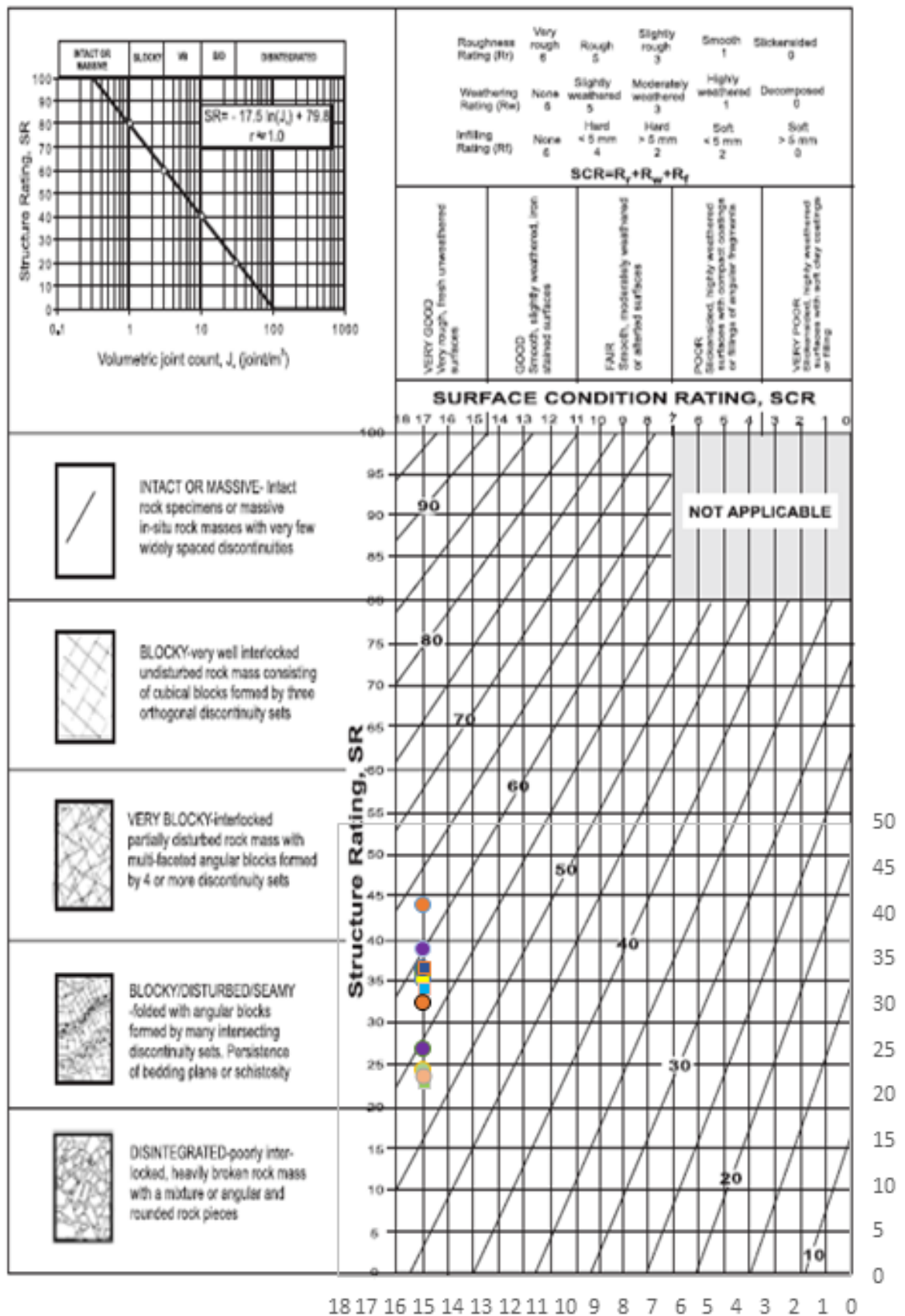
Изветряне на стените

Съгласно препоръките на ISRM, за всички точки на изследване установените степени на изветряне на стените на пукнатините са оценени като „неизветрели“ до „слабо изветрели“ със средна оценка от 5.

Запълнител

По време на полевите работи се установи за цялата кариера, че пукнатините на практика са без запълнител или с много тънък (<1 mm) запълнител от зърнест материал (дребен пясък и скално брашно), вероятно продукт на взривяванията или отложен при протичане на повърхностни води през пукнатините. За всички точки този показател е оценен **средно на 5**.

Така общата оценка на показателя за състоянието на стените на пукнатините (SCR) е оценен с 15 бални точки за целия изследван масив.



Фиг. 9-4. Диаграма за определяне на геоложкия индекс на якостта (GSI) в масива на рудник „Арасел“ обща за всички измервателни станции в гранодиорити и палеозойски гранитоиди (по Sonmez and Ulusay, 1999).

Табл. 9-5. Обобщени стойности на геоложкия индекс на якостта (GSI) в масива на рудник „Арасел“ за всички измервателни станции в гранодиорити и палеозойски гранитоиди.

Показатели	RQD	Jv	SR	SCR	GSI
Средно		17.85	30.37	15	51.8
SD		-	-	-	2.6
Характеристична стойност		-	-	-	50.5

Като цяло състоянието на масива в изследваните станции съгласно критериите на класификацията се характеризира като „много добро“. При определянето на тази характеристика се взимат предвид характеристиките на пукнатините свързани с тяхната грапавост, степен на изветряне и наличие/отсъствие на запълнител в пукнатините.

Показателите **SR** и **RQD** за всяка станция са изчислени съгласно формули (6) и (2) съответно. Получените резултати за всяка станция са представени на в Табл. 9-5. Обобщените резултати показват (Фиг. 9-4), че стойностите на GSI за целия масив се изменят в сравнително тесен диапазон. Така минимално определената стойност се равнява на 48 бални единици, а максималната е равна на 56. Така средната му стойност е 51,8, а стандартното отклонение е 2,6. При по-нататъшното характеризиране на за изследвания участък от масива е приета характеристична стойност за $GSI = 50$, което го характеризира като масив със „задоволително“ качество.

9.4 Определяне на якостта на срязване

Определянето на якостните показатели на масива е направено на базата на обработка и интерпретацията на данните от лабораторните и полеви измервания, като са определени следните видове якостни показатели:

- Якост на срязване на ненарушената скала
- Якост на срязване на скалния масив
- Якост на срязване на материалите от тектонските зони
- Коефициент на триене по пукнатини

Характеристичните стойности за всеки от основните показатели са определяни чрез математико-статистическа обработка или чрез прилагане на нормативни коефициенти на сигурност.

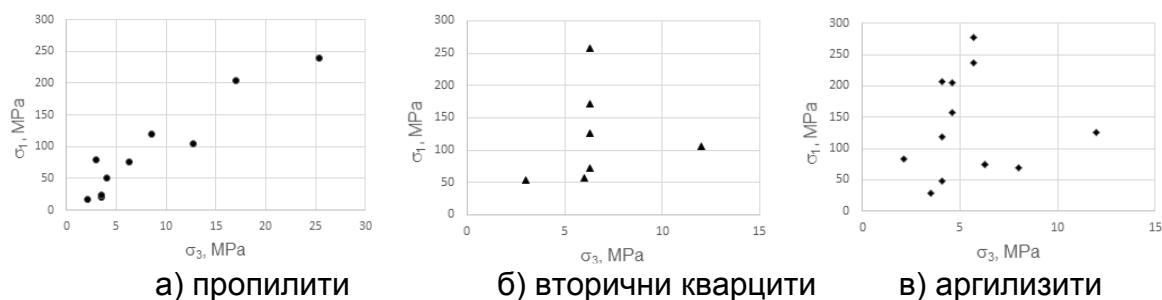
Поради значителното разсейване на данните от триаксиалните лабораторни изследвания на скалите от масива, съответните характеристични стойности за ъгъла на вътрешно триене и кохезията са получени, чрез разделяне на усреднените с коефициенти на сигурност $K_{tg\phi} = 1,2$ и $K_c = 1,6$, които са приети от Наредба № 12 за геозащитна дейност в свлачищни райони.

За обемните тегла на скалите, средните стойности са приети за характеристични.

9.4.1 Определяне на якостта на ненарушената скала

Определянето на якостните показатели на ненарушените скални разновидности е извършена съгласно якостния модел на Hoek-Brown (2002), като за ненарушени скалните проби стойностите на коефициентите s и a са съответно $s = 1,0$ и $a = 0,5$.

За определяне на параметрите на посочената якостна зависимост са използвани данните за върховата якост на срязване от извършените триаксиални изследвания на скални проби от рудника, като зависимостите „ σ_1 - σ_3 “ за трите вида скали са представени на Фиг. 9-5, а получените резултати от обработката им с програмата RockLab в Табл. 9-6.



Фиг. 9-5. Зависимости „ σ_1 - σ_3 “ за скалите от масива.

Табл. 9-6. Резултати от обработката на триаксиалните изследвания с програмата RockLab.

Вид скала	m_i	σ_{ci} , MPa	Лабораторна якост на натиск σ_{ci} , MPa
Пропилит	50	72,8	52,6
Вт. кварцит	49	18,6	37,6
Аргилизит	50	21,5	23,3

По предоставените данни от лабораторни изследвания, усреднените стойности за обемните тегла на типовете скали са следните (Табл. 9-7).

Табл. 9-7. Усреднени стойности за обемните тегла на типовете скали.

Вид скала	Обемно тегло γ_n , kN/m ³
Пропилит	26,2
Вт. кварцит	25,9
Аргилизит	23,3

9.4.2 Определяне на якостта на скалния масив

Стойностите на показателите m_i , s и a са коригирани съгласно стойността на показателя GSI, както са посочени във формули (12), (13) и (14). Стойността на показателя на нарушеност D , предвид на общото състояние на бордовете в кариерата и препоръките на Ноек (Фиг. 4-2), е приетата $D=1,0$. Изчисленията за якостните диаграми на скалните типове са направени с програмата RockLab1.0, където кохезията и ъгъла на вътрешно триене за определени с използването на следните параметри:

- GSI (характеристична стойност) = 50
- Показател на нарушеност $D = 1,0$
- Максимално нормално напрежение в масива, определено за

височини на общия откос на кариерата $H = 285 \text{ m}$ (кота дъно 630 м);
 $H = 365 \text{ m}$ (кота дъно 550 м) и $H = 465 \text{ m}$ (кота дъно 450 м).

Резултатите за средната якост на скалния масив са представени в Приложение В.2 и са обобщени в следващата Табл. 9-8.

Табл. 9-8. Резултати за средната якост на скалния масив.

Вид скала	H=285 m (кота дъно 630 м)		H=365 m (кота дъно 550 м)		H=465 m (кота дъно 450 м)	
	ϕ°	C, kPa	ϕ°	C, kPa	ϕ°	C, kPa
Пропилит	39.1	1478	37.1	1725	35.3	2006
Вт. кварцит	27.9	900	26.2	1041	24.5	1199
Аргилизит	30.7	861	28.9	1001	27.1	1158

Характеристичните стойности на якостните показатели са получени от средните, коригирани с приетите по-горе коефициенти на сигурност $K_{tg\phi} = 1,2$ и $K_C = 1,6$, определени съгласно изистванията на Наредба № 12 за геозащитни строежи (Табл. 9-9).

Табл. 9-9. Характеристични стойности на якостните показатели.

Вид скала	H=285 m (кота дъно 630 м)		H=365 m (кота дъно 550 м)		H=465 m (кота дъно 450 м)	
	ϕ°	C, kPa	ϕ°	C, kPa	ϕ°	C, kPa
Пропилит	31.2	923.8	29.7	1078.1	28.4	1253.8
Вт. кварцит	22.7	562.5	21.4	650.6	20.1	749.4
Аргилизит	24.9	538.1	23.5	625.6	22.1	723.8

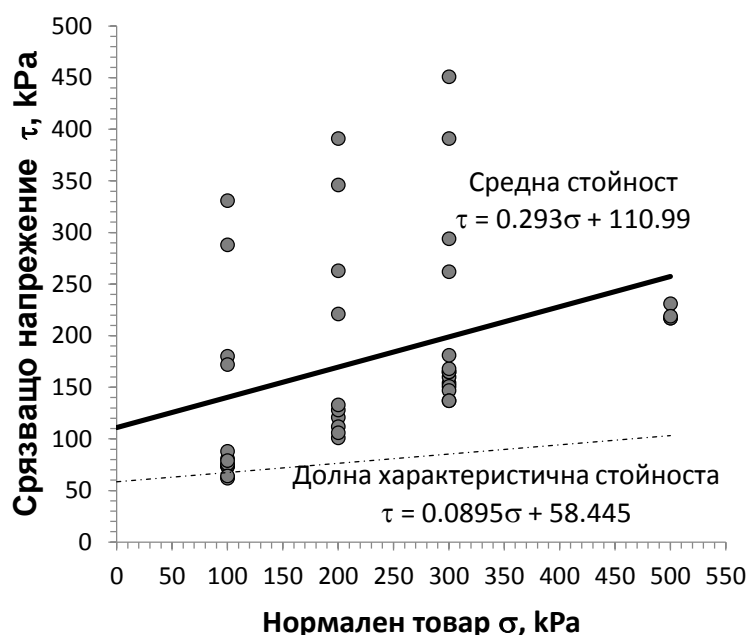
9.4.3 Определяне на якостта по тектонски зони (разломи)

Якостта на тектонската глина е определена от предоставените данни за взети и изследвани проби от тектонски зони от сондажите в рудника. Получените средни стойности са $\phi = 16,3^\circ$ и $C = 111,0 \text{ kPa}$ (Фиг. 9-6). Поради значителното разсейване на данните от срязванията, статистическата обработка на резултатите по метода на най-малките квадрати дава много ниски и недостоверни стойности за характеристичните стойности за ъгъла на вътрешно триене и кохезията. Потози причина, те са обработени като самостоятелни характеристики (Табл. 9-10).

По предоставените данни от лабораторни изследвания, средната стойност за обемното тегло на тектонската глина е $\gamma_n = 22,6 \text{ kN/m}^3$.

Табл. 9-10. Обобщени резултатите от взетите и изследвани проби от тектонски зони (тектонска глина).

Показател	$\phi,^\circ$	C, kPa	Обемно тегло $\gamma_n, \text{ kN/m}^3$
Средно	23.0	82.0	22.6
SD	4.1	78.6	-
Характеристична стойност	21.0	44.8	-



Фиг. 9-6. Зависимост „ τ - σ “ за материалите от тектонските зони.

9.4.4 Якост на срязване по пукнатините

Якостта на срязване по пукнатините е определена по формулата на Barton (1976) за определяне на триенето по тях – уравнение (20).

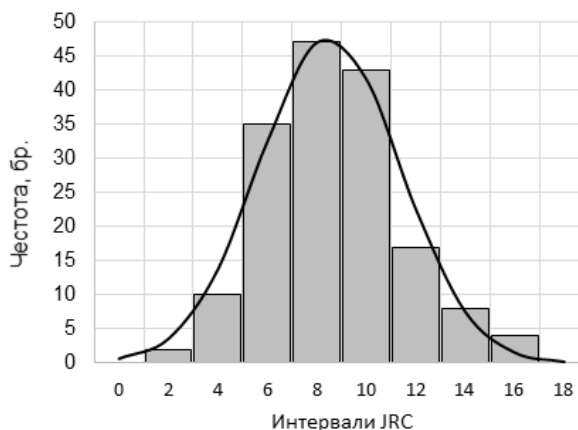
9.4.4.1 Коефициент на грапавост на пукнатините (JRC)

Коефициентът на грапавост на пукнатините е определен на базата на визуално сравняване със стандартна скала на Barton et al, 2007 (

Фиг. 9-7) със профилите на грапавост на стените на пукнатините документиран на полето. Регистрирани са 167 профили по пукнатини с дължини от 40 см, като определените стойности за JRC по станциите на наблюдение. На

Фиг. 9-7 се вижда, че стойностите на показателя за всички станции се характеризират с нормално разпределение, като за него са определени следните характеристични стойности:

- $JRC_{ave} = 8,5$
- $JRC_{RSD} = 2,91$
- $JRC_{k-} = 8,1$
- $JRC_{k+} = 8,9$.



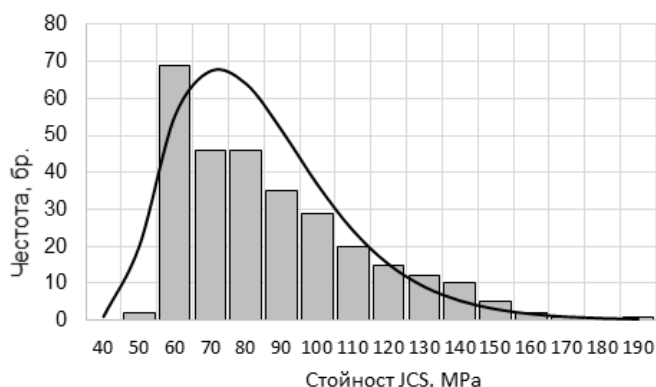
Фиг. 9-7. Диаграма на разпределение на стойностите на показателя JRC.

9.4.4.2 Якост на стените на пукнатините (JCS)

Якостта на стените на пукнатините е определена полево с използване на чук на Schmidt тип L. Общо са направени 518 измервания във вертикална, хоризонтална и наклонена посока. След изключване на непредставителните стойности и корекциите за посока на удара, якостта на натиск на стените на пукнатините е определена по формула (21), като γ обемното тегло на скалата е прието средно за 25 kN/m³. На

Фиг. 9-8 се вижда, че разпределението на получените стойности на показателя се характеризира по-скоро като лог-нормално разпределение, което приведено към нормално определя следните параметри на извадката:

-
-
- $JCS_{ave} = 78,8 \text{ MPa}$
- $JCSR_{SD} = 1,39 \text{ MPa}$
- $JCS_{k-} = 76,6 \text{ MPa}$
- $JCS_{k+} = 80,0 \text{ MPa}$.



Фиг. 9-8. Диаграма на разпределение на стойностите на показателя JRC.

9.4.4.3 Базов ъгъл на триене по пукнатини

Базовият ъгъл на триене е определен от предоставените данни за върховата и остатъчна якости на срязване по пукнатини в лабораторни условия (Табл. 9-11).

Табл. 9-11. Стойности за върховата и остатъчна якости на срязване по пукнатини в лабораторни условия.

Показател	C_{peak} kPa	ϕ_{peak} °	C_{res} kPa	ϕ_{res} °	Sect. cm ²
Средно	88.9	31.6	19.5	31.4	36.6
SD	73.7	6.8	18.2	6.3	-
Характеристична	66.0	29.4	13.8	29.5	-

стойност					
-----------------	--	--	--	--	--

Заб: „peak“ – върхова якост; „res.“ – остатъчна якост; „Sect.“ – площ на срязване.

9.4.4.4 Ъгъл на триене по пукнатини в масива

Определянето на ъгъла на вътрешно триене по пукнатините ϕ_{joint} в масива е извършено по използвана по-горе частично преработена формула (28) на Barton.

Оценката на мащабния ефект за показателите JCS и JRC е извършена по формули (22) и (23), като са използвани следните стойности:

- характеристичните стойности на участващите във формулата параметри са $JRC_0 = JRC_K = 8,1$ и $JCS_0 = JCS_K = 76,6$ МПа
- $L_0 = 0,4$ м и максимална стойност на $L_n = 10,0$ м,

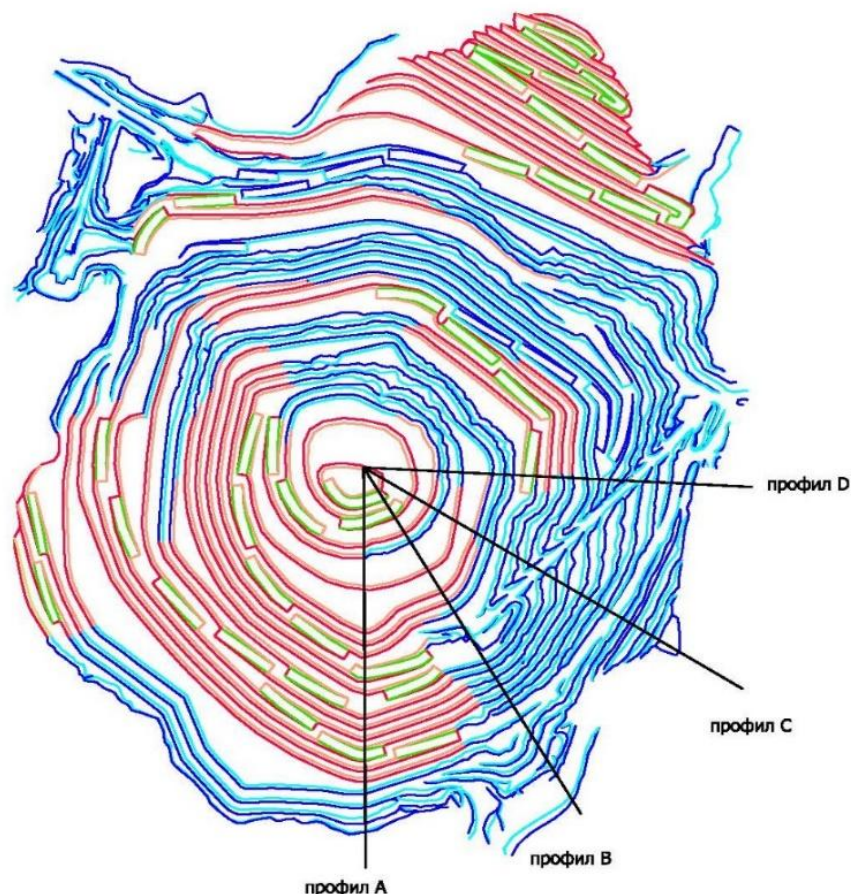
при което за стойностите в масива се получава $JRC_n = 4,6$ и $JCS_n = 43,4$ МПа.

При определяне на ъгъла на триене по пукнатините в масива, стойността на σ_p е приета, че съответства на средна дълбочина на развитие на потенциалните повърхнини в рудника от 100 м. При средно обемно тегло на скалите 26 kN/m³, получената стойност за σ_p е 2600 kPa или 2,6 МПа, като за характеристичната стойност на ъгъла на триене се получава:

$$\phi_{joint} = 29.5 + 4.6 \log_{10} \left(\frac{43.4}{2.60} \right) = 35.3^\circ$$

9.5 **Съставяне на геомеханични модели**

Геомеханичните модели за стабилитетните изчисления са съставени на 4 бр. профилни линии, означени като Профил А, профил В, Профил С и Профил D. Тяхната ориентация е представена на следващата Фиг. 9-9.



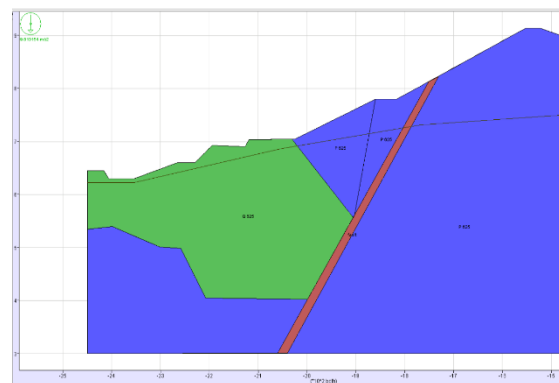
Фиг. 9-9. Схема на теренната повърхност на рудника с нанесени профили A, B, C и D.

Геомеханичните модели на откосите използвани в стабилитетните изчисления са съставени на базата на:

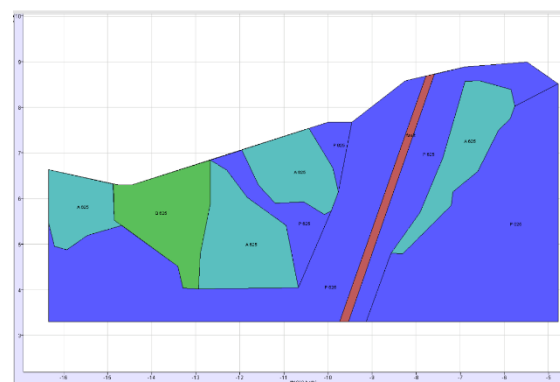
- проектна теренната повърхност на рудника за кота дъно 630 м.
- геоложките разреза по направление на профилните линии по променени скали – пропилити, вторични кварцити и аргилизити;
- най-неблагоприятно ориентирани по посока на откосите групи пукнатини или техни пресечници;
- разломните зони, чиято посока на западане е ориентирана по посока на откосите имат влияние върху тяхната устойчивост;
- характеристикните якостни показатели за скалния масив по установените скални видове и разломните зони, показателите на триене по пукнатините.
- прогнозни нива на подземните води в откосите;
- коефициентът на сеизмичност.

9.5.1 Моделни геоложки разреза

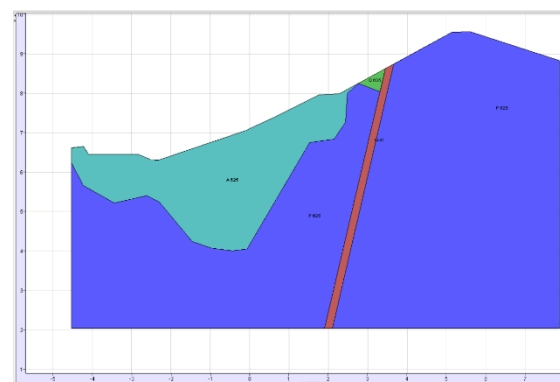
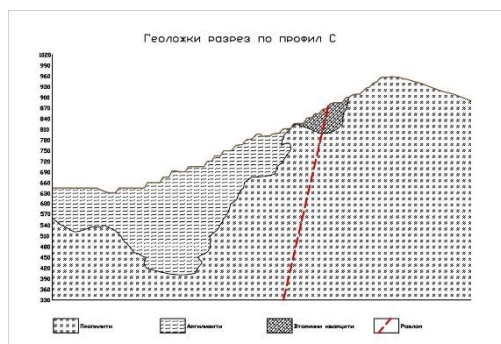
Използваните геоложки разреза са представени на следващата фигура Фиг. 9-10, Фиг. 9-11, Фиг. 9-12 и Фиг. 9-13, както и тяхната схематизация за нуждите на моделирането.



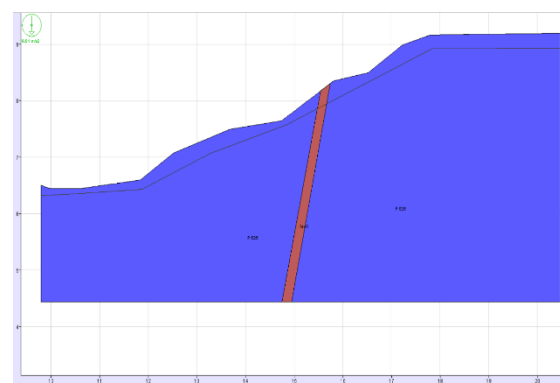
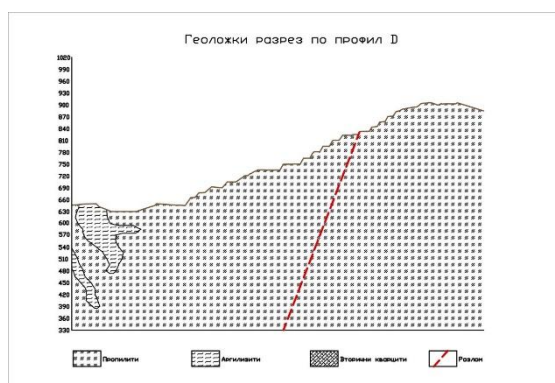
Фиг. 9-10. Геоложки разрез и схематизация по профил А.



Фиг. 9-11. Геоложки разрез и схематизация по профил В.



Фиг. 9-12. Геоложки разрез и схематизация по профил С.



Фиг. 9-13. Геоложки разрез и схематизация по профил D.

9.5.1 Определяне на ориентацията на структурните нарушения по отделните профили

Използваният за стабилитетните изчисления софтуер FLAC Slope позволява в геомеханичните модели да се отчете анизотропността по една постоянно ориентирано (системно и повсеместна) направление, по която масивът се характеризира със специфични (обикновено по-ниски) свойства. Практически, това позволява да се изследва влиянието на една или няколко групи пукнатини, чиято посока западане е близка до направлението на профилната линия и които ще имат най-голямо влияние върху стабилитета на масива по това направление.

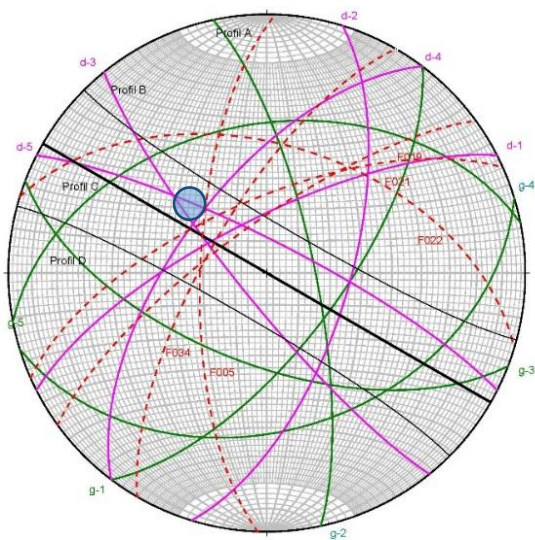
За целта е извършен анализ на стереографските проекции на установените групи пукнатини и разломи, при който, за всяка профилна линия, са установени тези от тях, или потенциални пресечници между тях с посока на затъване близка до ориентацията на профилната линия. Като критерий за допустимост е прието, че тяхната ориентация не трябва да се различава от посоката на профилната линия с повече от $\pm 15^\circ$. Получените резултати са представени на следващата Фиг. 9-14 и Табл. 9-12.

Табл. 9-12. Групи пукнатини и пресечници по профилни линии.

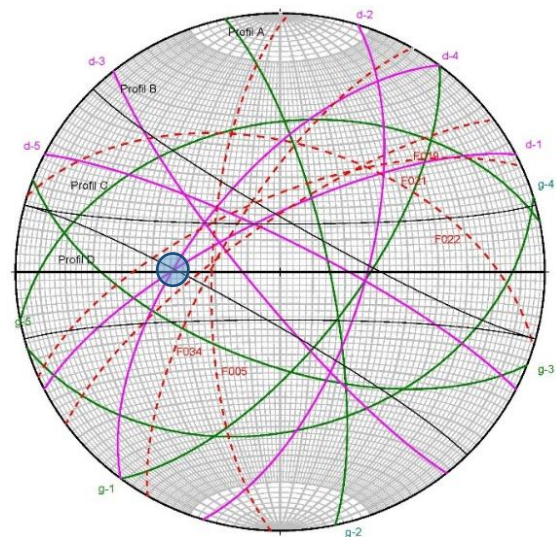
Профил	Групи / пресечници	Среден наклон
A	(g-2)x(g-5)x(d-4)	43°
B	d-3	59°
	(d-3)x(d-4)x(d-5)	61°
		Средно 60°
C	d-3	59°
	(d-3)x(d-4)x(d-5)	61°
		Средно 60°
D	(g-3)x(d-4)	48°

В моделната схема на откосите са включени и разломните зони, чиято посока на западане е ориентирана по посока на откосите имат влияние върху тяхната устойчивост. Като такива, по отделните профили са приети следните разломи и ориентация (по номенклатурата използвана от Възложителя):

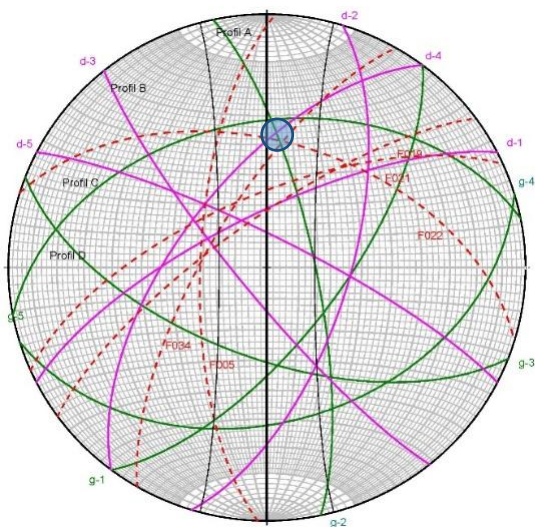
- По профил А – разлом F22 (наклон 49°)
- По профил В – разлом F19 (наклон 75°)
- По профил С – разлом F12 (наклон 77°)
- По профил D – разлом F (наклон 69°).



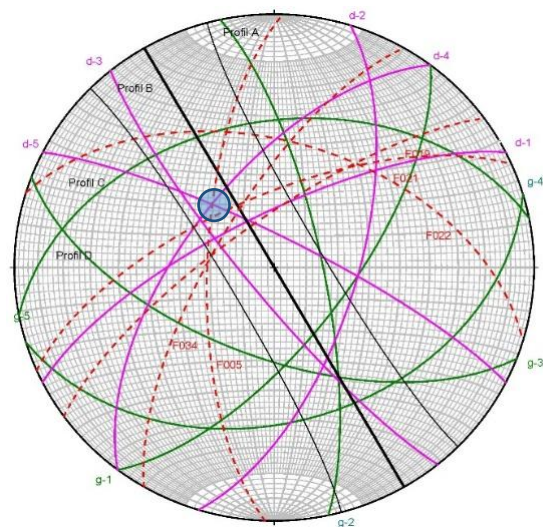
Профил А



Профил В



Профил С



Профил D

Фиг. 9-14. Стереографски проекции на масива за профили А, В, С и D.

Ориентацията на разломите по отношение на посоката на профилите са показани също на стереографските проекции на Фиг. 9-14. Те са включени и в геометричните модели на откосите (Фиг. 9-10, Фиг. 9-11, Фиг. 9-12 и Фиг. 9-13), като с оглед отчитането им в мрежата от крайни елементи, тяхната дебелина условно е завишена до 10-15 м.

9.5.2 Характеристични показатели

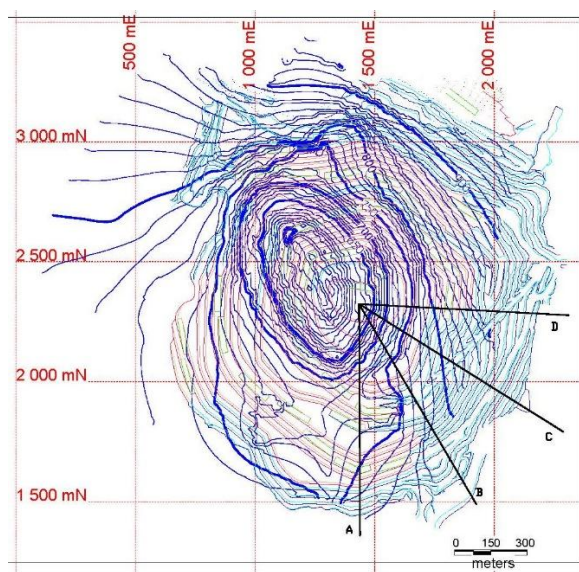
Характеристичните якостни показатели са обосновани и определени в предходните части от разработката, като тук ще представим обобщена Табл. 9-13 със съответните стойности.

Табл. 9-13. Обобщена таблица със характеристичните якостни показатели за масива.

Вид скала	Обемно тегло γ , kN/m ³	H=285 m (кота дъно 630 м)		H=365 m (кота дъно 550 м)		H=465 m (кота дъно 450 м)	
		ϕ°	C, kPa	ϕ°	C, kPa	ϕ°	C, kPa
Пропилит	26.2	31.2	923.8	29.7	1078.1	28.4	1253.8
Вт. кварцит	25.9	22.7	562.5	21.4	650.6	20.1	749.4
Аргилизит	23.3	24.9	538.1	23.5	625.6	22.1	723.8
		Общо					
Тектонска зона	20.0	21,0	44,8	-	-	-	-
		Общо					
Пукнатини	-	36,5	-	-	-	-	-

9.5.3 Прогнозни водни нива в масива

За моделиране на водните нива в масива в разглеждания участък са използвани резултатите от моделните изследвания за вариантите за отводняване и осушаване на Рудник "Асарел" от 2009 г. В частност е разгледан най-неблагоприятният вариант за разработване на котлована без дренажни съоръжения. Доколкото граничните условия (водните нива по външния контур на рудника) практически не се изменят, тук е разгледано решението за дълбочина на рудника до кота 555, като върху него са нанесени изчислителните профили (Фиг. 9-15).



Фиг. 9-15. Моделна схема на разпределение на водните нива без дренажни съоръжения при разработване на котлована до кота 555.

С оглед на това, както и геометрията на терена на самите профили в зоната на горния контур на рудника, са приети коти на максимални водни нива както следва:

- профил А – 750 м
- профил В – 820 м
- профил С – 850 м
- профил D – 900 м.

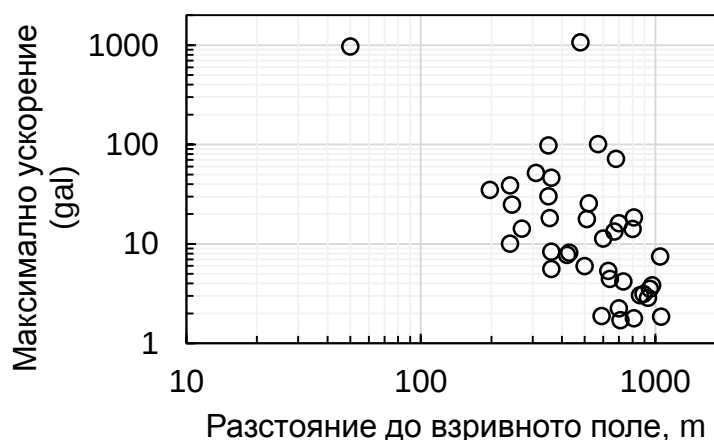
Надолу по откосите е прието, че водните нива затъват плавно до дълбочина около 10 м под дъното на рудника при отделните варианти. Приетите нива на подземните води са показани на схематизирани разреза на Фиг. 9-10, Фиг. 9-11, Фиг. 9-12 и Фиг. 9-13.

9.6 Оценка на динамичните въздействия

Динамичните въздействия върху откосите се генерират от два възможни източника – взривните работи в рудника и сеизмични въздействия при земетресение.

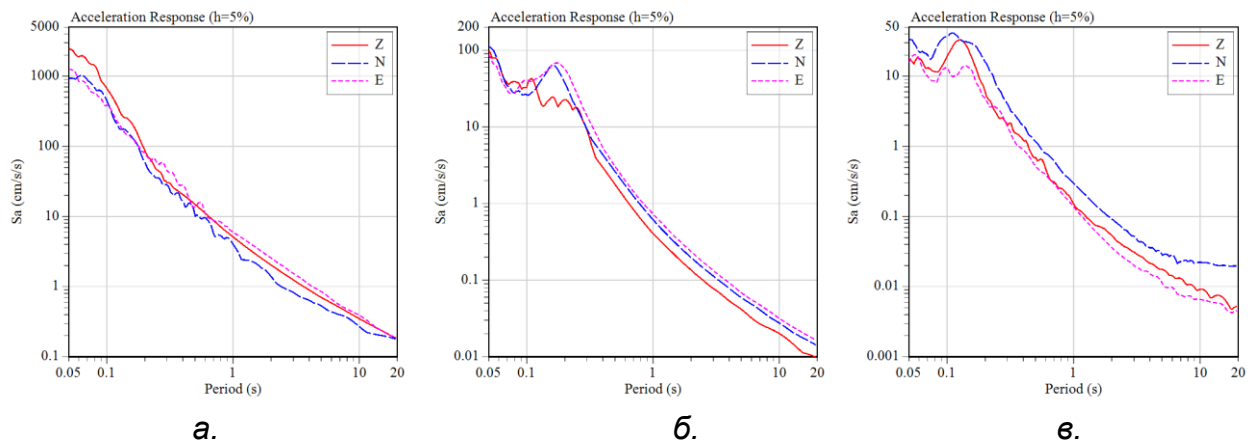
9.6.1 Въздействия от взривни работи

За оценка на динамичното въздействие върху състоянието на скалния откос на различни стъпала в зоната на югоизточния борд са извършени 58 измервания на ускоренията при взривни работи, практически по целия контур на рудника. Резултатите показват (Фиг. 9-16), че на разстояния между 200 м и 1000 м от точките на измерване, максималните хоризонтални ускорения преобладаващо не надвишават 0.1g ($1 \text{ gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 0.001g$), с изключение на едно много близко взривяване, показващо стойности на максималните абсолютни ускорения, от порядъка на 1g. Това се обяснява с факта, че в близката околност на взривовите енергията се пренасят от вълни с много високи честоти, като поради напукаността на скалите, високочестотните компоненти на въздействието затихват много бързо и на по-далечни разстояния (над 200 м) хоризонталните ускорения бързо намаляват.



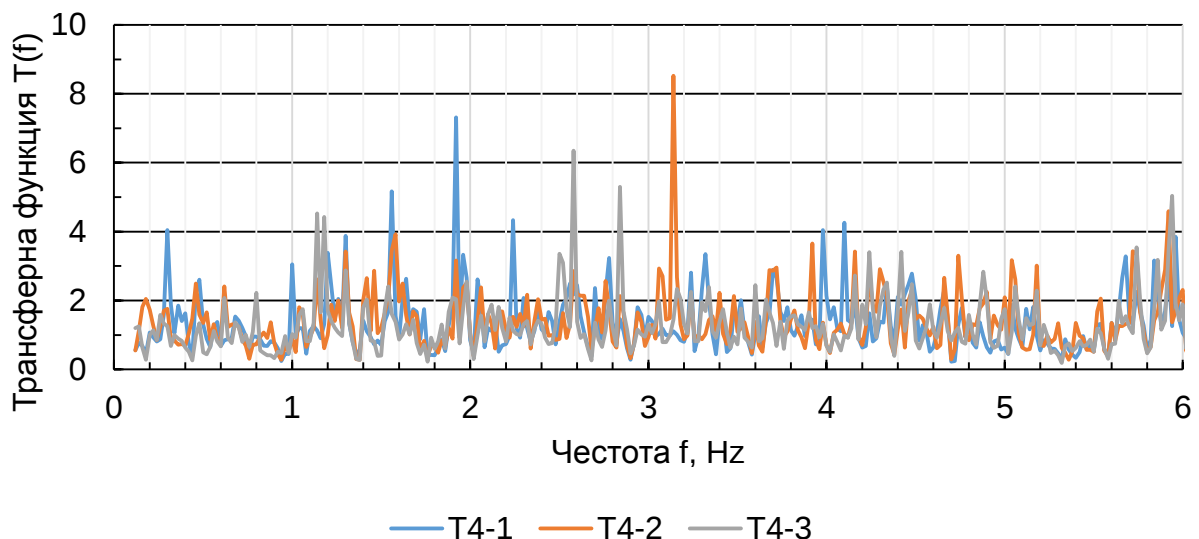
Фиг. 9-16 Зависимости между максималното ускорение и разстоянието до взрива.

При направеното изследване, за всяка точка на измерване са определени спектрите на ускоренията в посоки N (север), E (изток) и Z (дълбочина), които имат доста близък характер. Те се различават основно по височината на „билото“ в зоната на максималните ускорения, като те са най-големи при най-близките взривявания и намаляват с отдалечаване на взривното поле (Фиг. 9-17).



Фиг. 9-17 Спектри на ускоренията за разстояния от точката на измерване 50 м (а), 240 м (б) и 510 м (в).

Трансферни функции от натурни измервания



Фиг. 9-18 Спектрални функции, определени от натурните измервания за коти 733 м (T4-1), 811 м (T4-2) и 913 м (T4-3).

Направените измервания на собствените колебания на масива в зоната на югоизточния борд на рудника за три нива в рудника (Фиг. 9-18) показват, голям брой потенциални собствени честоти, като основните пикове, които могат да се идентифицират са между 0,3 Hz и 3,1 Hz, съответстващи на периоди на колебания между 0,3 и 30 s. Тези стойности, отнесени към спектралните ускорения определят максимални компонентни ускорения по посоки N и E в масива от 30 gal за максимално близки взривявания (Фиг. 9-17а). Определеното резултантно хоризонтално ускорение е $42 \text{ gal} = 0,42 \text{ m/s}^2 = 0,042g$. Тук трябва да се отбележи, че на базата на направените измервания, за осигуряване на безпроблемно функциониране на трошачните и транспортни съоръженията в югоизточния борд е препоръчано най-близките взривявания да бъдат с еднократни заряди до 500 kg на минимални разстояния от 70-75 м.

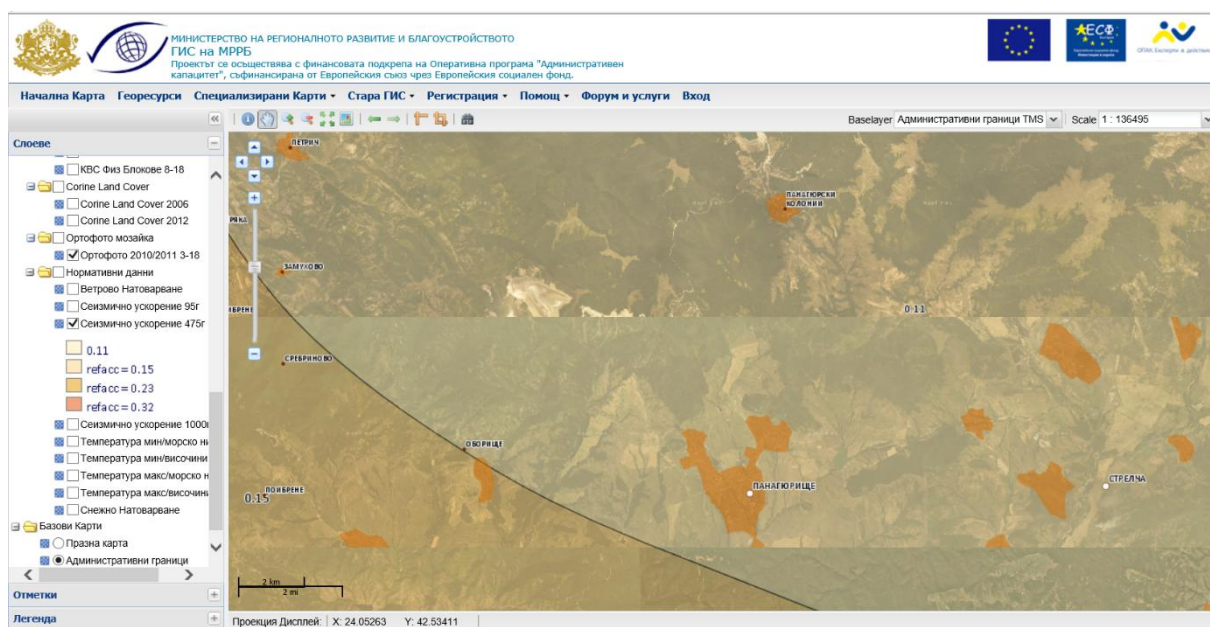
9.6.2 Коефициент на сеизмичност

Съгласно резултатите и препоръките относно влиянието на взривните работи върху устойчивостта на откосите, коефициентът на сеизмичност е определен съгласно картата за референтните сеизмични ускорения за България за 475-годишен период на повтаряемост, включена в Националното приложение към Еврокод 8. (Фиг. 9-19). От нея се вижда, че районът на рудник „Асарел“ попада в зона с максимално референтно ускорение $aR = 0,11g$. Сеизмичният коефициент се определя по формулата:

$$(29) \quad K_c = 0,5 \cdot aR \cdot S = 0,5 \cdot 0,11 \cdot 1,0 = 0,055,$$

където S е коефициент на усилване в зависимост от типа на земната основа. Доколкото преобладаващо скалната подложка се разкрива на самата теренна повърхност, той се приема равен на 1,0.

Получената стойност е съпоставима, но по-висока от максималното ускорение индуцирано от взривните работи и се приема като характеристична за стабилитетните изчисления.



Фиг. 9-19. Карта на района за референтните сеизмични ускорения за България за 475-годишен период (ГИС на МРРБ).

9.7 Стабилитетни изчисленията

Вариантните изчисления за определяне на устойчивостта на скалните откоси при съществуващо положение на рудника с дълбочина до кота 630 м и устойчивите конфигурации на борда до проектни дълбочини 550 м и 450 м са извършени с програмния продукт FLAC Slope. Устойчивостта на проектите откоси за крайна дълбочина на рудника 630 м е оценена и по методите на Bishop и Janbu, като е използван програмния продукт Slope на фирмата GeoStru.

При стабилитетните изчисления са разгледани следните варианти и комбинации от условия:

- За всеки от профилите са определени коефициентите на устойчивост при последователно вертикално удълбочаване на рудника до коти 630 м, 550 м и 450 м. При всеки от вариантите началните наклони на откосите до нивото на площадките, върху които са разположени

съоръжения от трошачния комплекс (основна площадка и транспортна лента) са запазвани.

- За различните коти на дъното, водните нива в масива са интерпретирани по откосите до дълбочини около 10 м под дъното на рудника, при запазване на началните нива в горната част на бордовете.
- За началното състояние на рудника (кота дъно 630 м), стабилитетните изчисления са направени без и с отчитане на влиянието на системните структурни нарушения (само при използване на програмния продукт FLAC Slope).
- В зависимост от получените резултати, допълнително са определени дълбочините и конфигурациите на бордовете по отделните профили, съответстващи на приетата минимална стойност на коефициента на устойчивост F_{min} . Аналогично, за дълбочина на рудника до кота 450 м, за всеки профил са определени примерни размери на предпазните целици, съответстващи на стойността на F_{min} .
- Изчисленията при F_{min} са проверени за условията със земетръс.

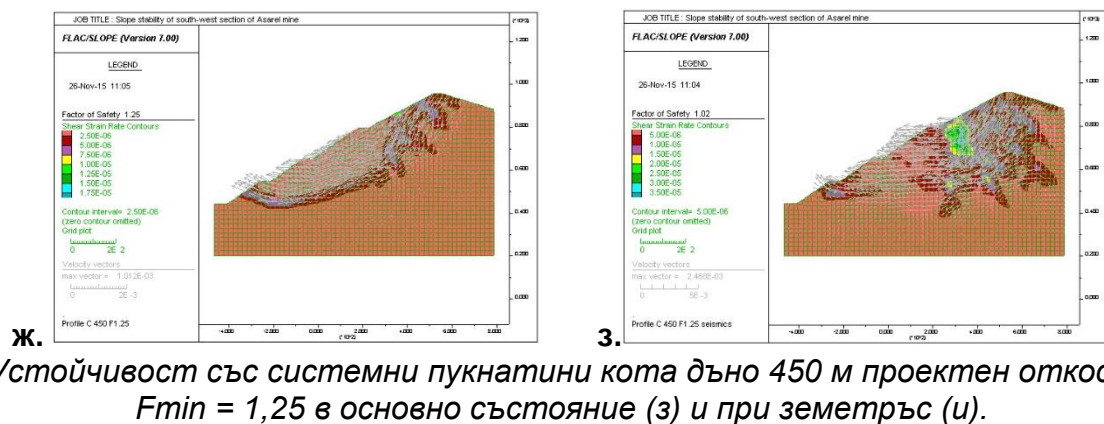
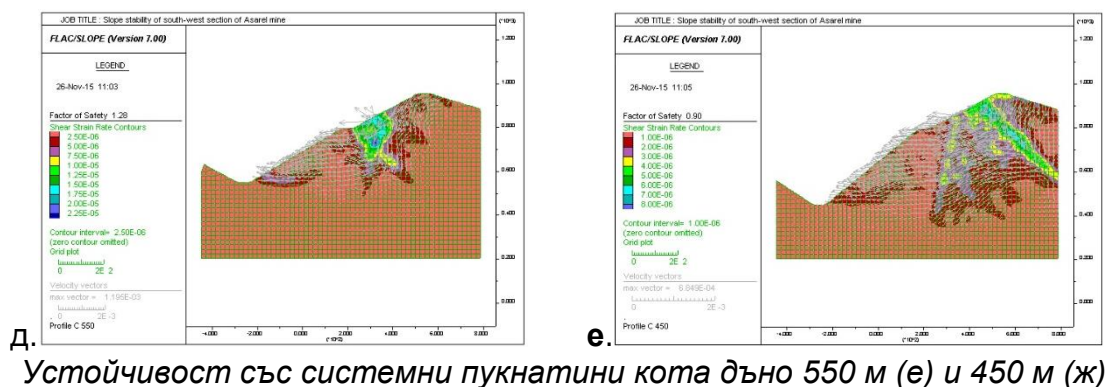
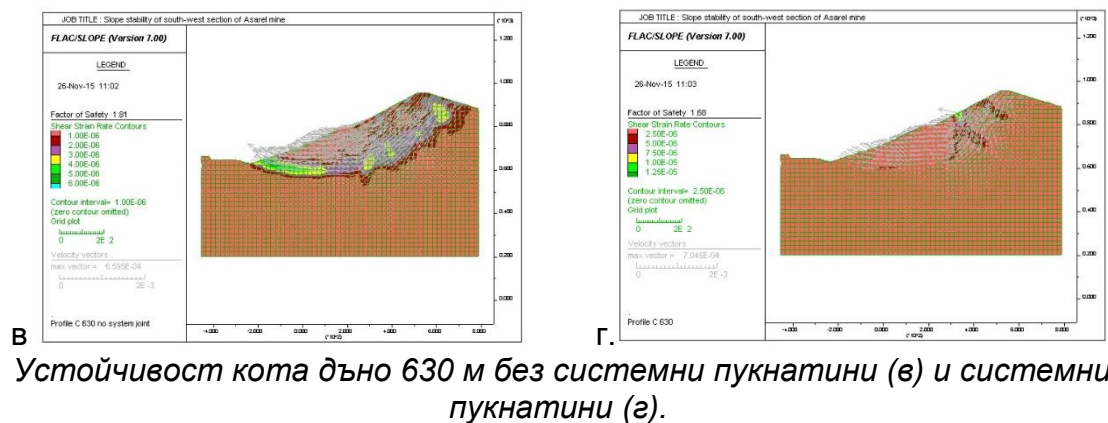
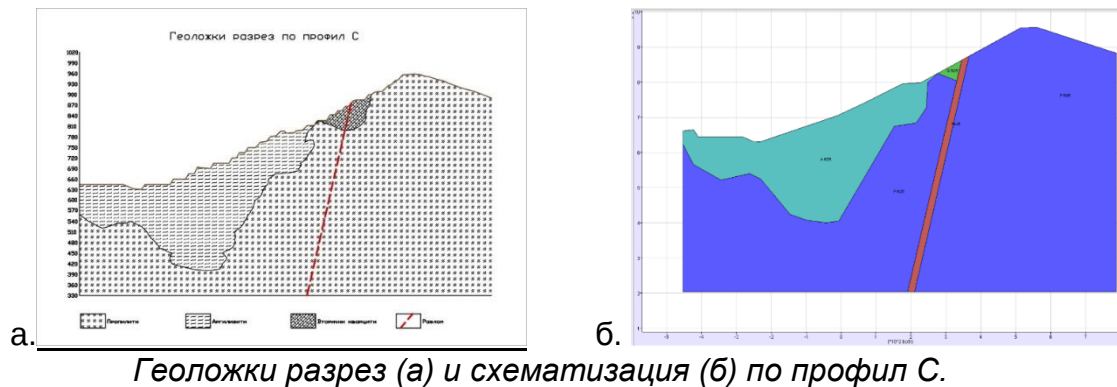
Основен критерий при анализа и интерпретацията на получените резултати са минимално допустимите стойности на коефициента на устойчивост. Веднага трябва да се отбележи, че в световната практика няма еднозначно възприети такива стойности. В зависимост от предназначението на бордовете, начините на оформяне и срока на експлоатация, различни автори и методики препоръчват минимални коефициенти на устойчивост от $F_{min}=1,05$ за работни бордове до $F_{min}=1,50$ и по-високи за неработни или окончателни бордове. Като средни стойности се приемат значения на $F_{min}=1,20\div 1,40$. В световната практика минималните коефициенти на устойчивост варират в зависимост от използвания метод, като общият принцип е колкото един изчислителен метод е теоретично по-издържан, толкова полученият коефициент на устойчивост е по-достоверен и съответно минимално допустимата стойност е по-ниска.

Нормативна база у нас разглежда минималните коефициентна устойчивост основно във връзка със промишленото и гражданско строителство и свлачищните процеси. Тя включва Наредба № 12 за геозащитна дейност и изискванията на Еврокод 7. И в двата документа има съответствие на минимално допустими стойности на коефициентите на сигурност и/или устойчивост в статичен режим $F_{min}=1,25$, като тази стойност е приета за валидна и при настоящия анализ. Предвид на ниското ниво на прогнозните сеизмични въздействия, за условията на земетръс е приета минимално допустима стойност на коефициента на устойчивост в границите $F_{min,s}=1,00\div 1,05$.

9.8 Резултати от изчисленията с програмния продукт FLAC Slope

Резултатите от стабилитетните изчисления при различните варианти по отделните профили са дадени в Табл. 9-14. На

Фиг. 9-20, като характерни, са показани резултатите от изчисленията по Профил С.



Фиг. 9-20 Резултати от изчисленията с програмния продукт FLAC Slope по Профил С.

Табл. 9-14. Резултати от стабилитетните изчисления при различните варианти по отделните профили.

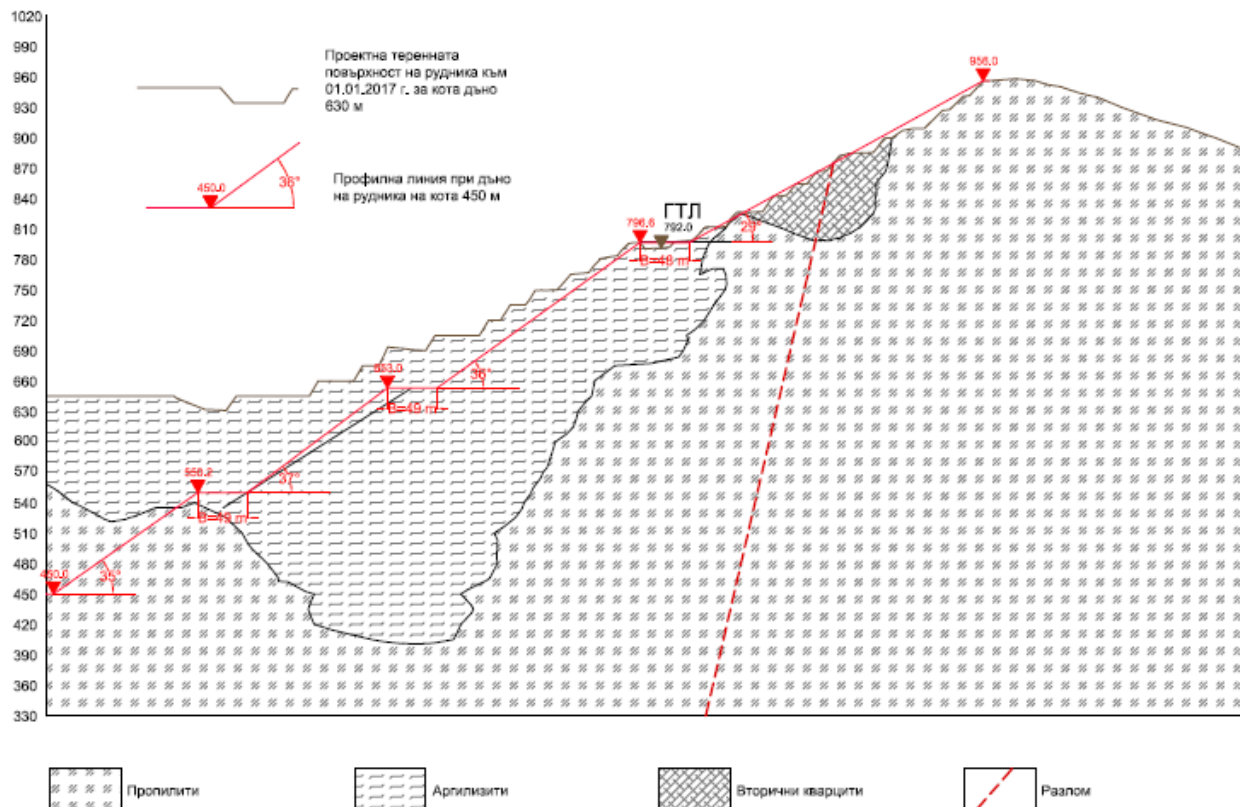
Профилна линия	Коефициенти на устойчивост			
	А	В	С	Д
Кота дъно 630 м				
Без системна напуканост	2,40	2,22	1,81	2,06
Със системна напуканост	2,20	2,14	1,69	1,98
Кота дъно 550 м	1,34	1,58	1,25	1,44
Кота дъно 450 м	1,09	1,00	0,98	1,02

- Влиянието на разломите върху устойчивостта е значително, като те „изтеглят“ процесите на формиране на пластични зони в тях. Този ефект се усилва с увеличаване на дълбочината на рудника (съответно височината на откоса), както и при земетръс. Той е най-силно изразен по профили С и D, които се характеризират с най-висока контрастност на свойствата по разома и преобладаващо наличие на пропилити като най-здравите скали от разреза. Повишеното присъствие на по-слабите скали в разреза (вторични кварцити и аргилизити) води до общо разсейване на този ефект.
- Състоянието на бордовете и проектната конфигурация на откосите до кота дъно 630 м се характеризират със значителна устойчивост, като няма опасност от свлачищни процеси, обхващащи целия борд.
- При удълбочаване на котлована на рудника до кота 550 м, устойчивостта на откосите остава по-висока от минимално допустимата, което позволява оставане на трошачния комплекс на сегашната си площадка.
- Удълбочаването на рудника до кота 450 м, без допълнителни мероприятия по отношение на устойчивостта, води до коефициенти на устойчивост близки до граничните, което ще създаде сериозни рискове за дестабилизиране на целите бордове.

За достигане в дълбочина на кота на дъното на рудника 450 м е прието, че в долната половина на бордовете ще се оформят по един или два предпазни целика (площадки) на коти около 570 м за Профил А и около коти 650 м и 550 м за останалите профили, които ще гарантират запазване на минимално допустимите коефициенти на устойчивост около $F_{\min}=1,25$ и няма да налагат преместване на трошачния комплекс. Това ще позволи и съществено увеличаване на генералните наклони на откосите от 27° - 30° до 32° - 37° (Табл. 9-15), което ще доведе и до оптимизиране на разходите по удълбочаване на рудника.

Проектните геометрични характеристики на профилите са представени в Приложение В.6, като на Фиг. 9-21 като пример е представено проектното решение за Профил С.

За определените по-горе конфигурации на бордовете при коефициенти на устойчивост $F_{\min}=1,25$, изчисленията за устойчивост при земетръс (Табл. 9-15) показват следните коефициенти на устойчивост.



Фиг. 9-21 Проектни геометрични характеристики по Профил С.

Табл. 9-15. Коефициенти на устойчивост на проектни откоси при кота дъно 450 м при земетръс.

Профилна линия		A	B	C	D
$F_{min,s}$		1,09	1,08	1,02	1,07
Среден наклон на откоса	32°	37°	33°	37°	

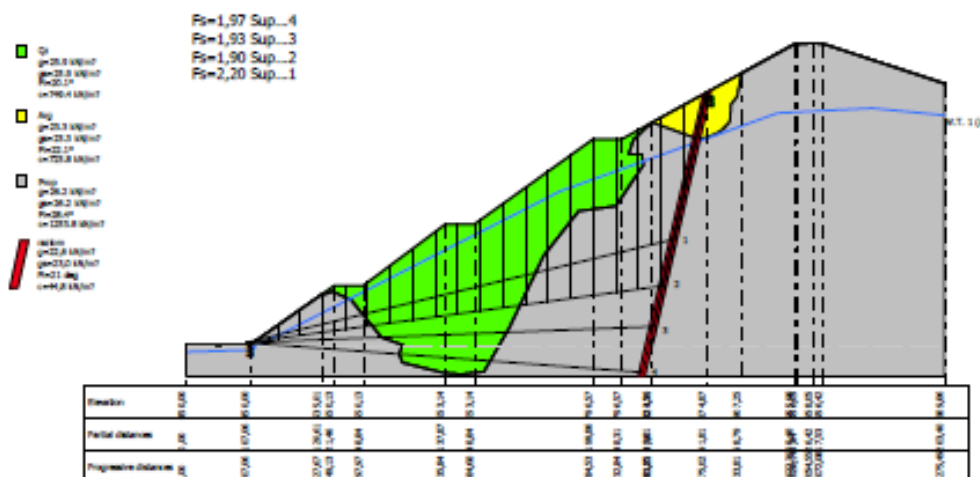
От тях се вижда, че коефициентите на устойчивост са в границите на приетия минимално допустим обхват на $F_{min,s} = 1,00 \div 1,05$ и по-високи, т.е. не може да се очаква, че евентуалните прогнозни земетресения ще застрашат така определените конфигурации на бордовете.

Трябва да се отбележи, че при настоящите изчисления не са отчитани евентуални мероприятия по понижаване на подземните води в масива, т.е. техният неблагоприятен ефект върху устойчивостта е максимален. От тази гледна точка, проектирането и изграждането на ефективни дренажни значително ще подобри стабилитетните условия не само в участъка на трошачната инсталация но и на целия рудник.

9.9 Резултати от изчисленията по методи на гранично равновесие

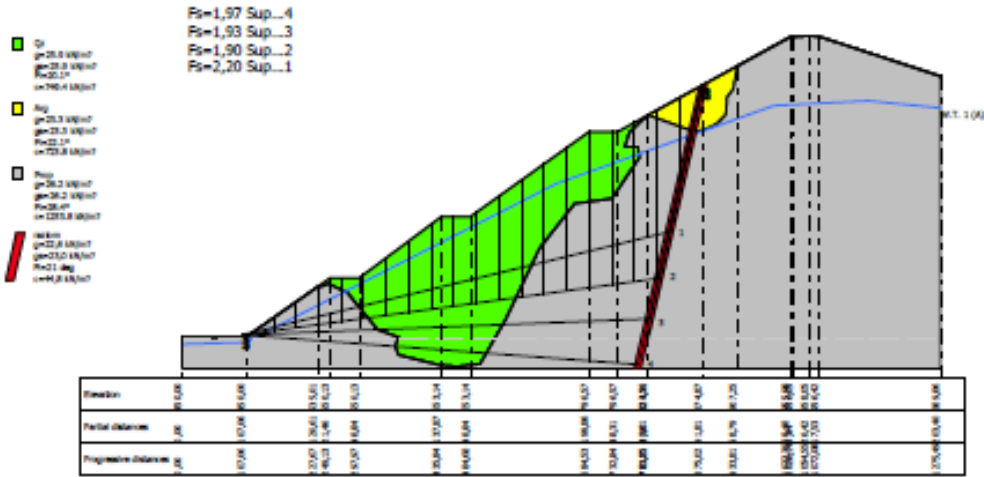
Както беше споменато по-горе, анализът на устойчивостта по методите на гранично равновесие на Bishop и Janbu е приложен само за крайните проектни конфигурации на откосите за кота дъно 450 м.

Методът на Bishop предполага оценка на общата устойчивост по кръгово-цилиндрична повърхнина (



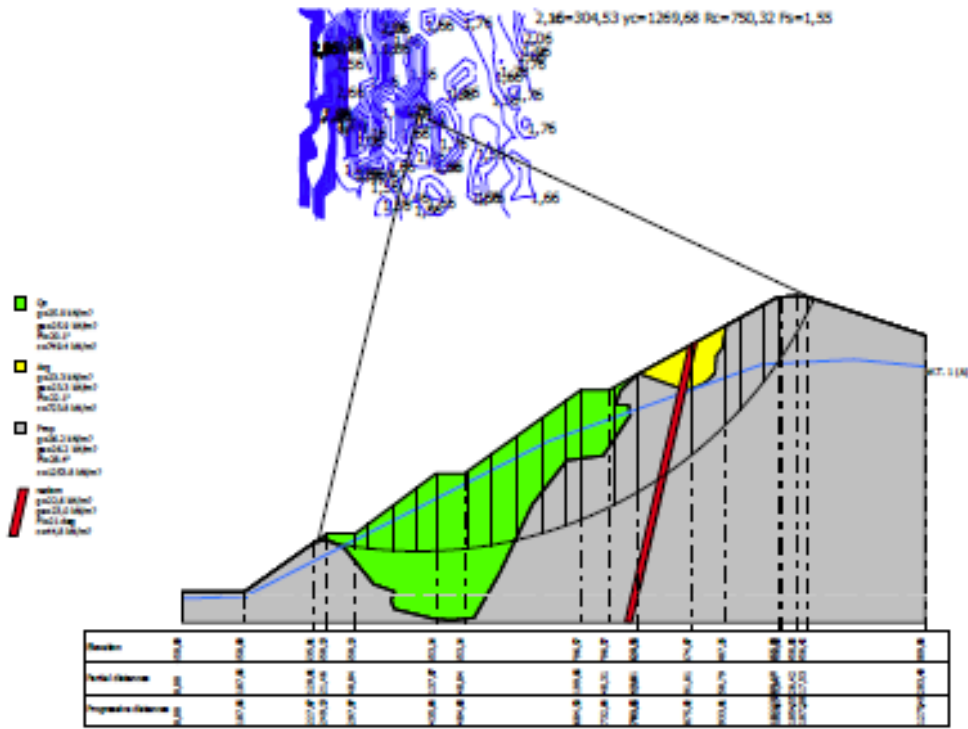
б.

Фиг. 9-22а), като той не може да отчете потенциалната възможност от участие на повече или по-малко издържан сегмент от разломите в процеса на загуба на устойчивост. По тази причина в откосите са моделирани би-линейни повърхнини на хлъзгане, като единият сегмент следва разломните нарушения в откосите до различни дълбочини, а вторият е привързан към петата на откосите (

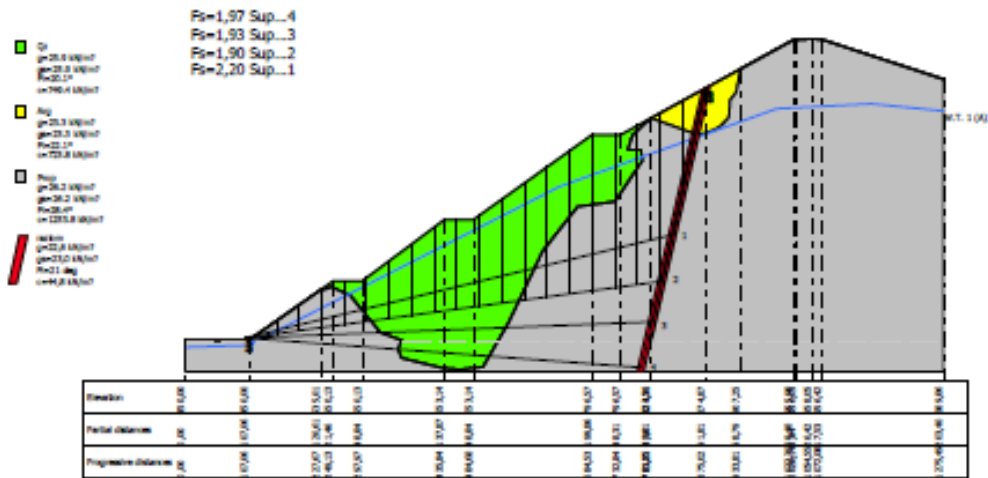


6.

Фиг. 9-22б).



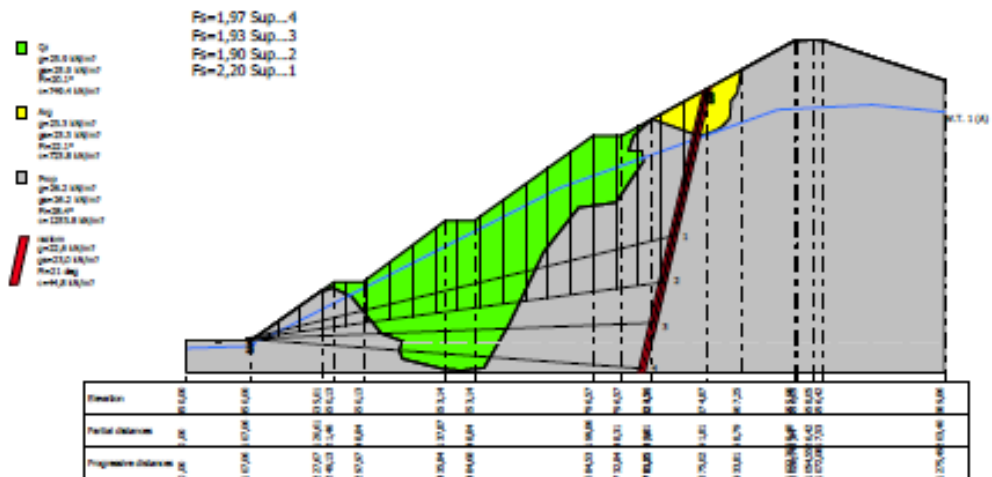
a.



6.

Фиг. 9-22 Резултати от изчисленията за обща устойчивост по Профил С по методите на Bishop (а) и Janbu (б).

Изчисленията са извършени при запазване на проектните водни нива в масива и показатели на скалните разновидности, но без отчитане на наличието на системна напуканост. Резултатите от стабилитетните изчисления при различните варианти по отделните профили са представени като разпечатки в Приложение В.6, като на



6.

Фиг. 9-22, за сравнение, са показани резултатите от изчисленията по Профил С.

Стойностите на коефициентите на устойчивост от тези изчисления са представени в Табл. 9-16.

Табл. 9-16. Коефициенти на устойчивост по методите на Bishop (а) и Janbu (б).

Профилна линия	A	B	C	D
Метод на Bishop				
$F_{\min}$ при основно съчетание на товарите	1,48	1,65	1,55	1,77
$F_{\min}$ при особено съчетание на товарите (земетръс)	1,30	1,42	1,36	1,56
Метод на Janbu				
$F_{\min}$ при основно съчетание на товарите	1,19	1,85	1,90	2,42
$F_{\min}$ при особено съчетание на товарите (земетръс)	1,07	1,63	1,67	2,16

Сравнението на резултатите от изчисленията по двете схеми показват, че по правило коефициентите на устойчивост по кръгово-цилиндрична повърхнина са по-ниски от тези по би-линейния модел, което определя този модел на свличане като по-вероятен. Изключение прави откосът по Профил А, което се дължи, от една страна, на наличието в петата на откоса тяло от аргилизити, който са най-слабата скала в разреза, както и на „силовото“ прекарване на значителна част основата на потенциалните повърхнини на хлъзгане през тях, от друга.

Както беше показано по-горе, проектните конфигурации на откосите по отделни профили определени с програмния продукт FLAC Slope са с коефициента на устойчивост $F_{\min} = 1,25 \div 1,28$ при основно съчетание на товарите и $F_{\min} = 1,02 \div 1,09$ при земетръс. Получените стойности по методите на гранично равновесие са от 15% до над 35% (и то само за метода на Bishop) по високи от тях. Дори да се отчетете евентуалното влияние на системната напуканост върху коефициентите на устойчивост от около 3%÷9%, все още разликите остават значителни.

Отново изключение прави устойчивостта по Профил А, където по една от би-линейните повърхнини коефициентът на устойчивост е $F=1,19$ и по-нисък от приетата минимална стойност. За достигане на приетото ниво на устойчивост $F_{\min}=1,25$, проектният профил е коригиран, като основната площадка на кота 570 м е разширена от 60 м на 100 м. това води и до общо повишаване на коефициента на устойчивост при земетръс. Предвид на факта, че устойчивостта на откоса по би-линейния модел е по-консервативна (по-ниска) от определената с числения модел, то може да се приеме, че новата проектна конфигурация ще бъде по-устойчива при оразмеряване по съответния числен метод заложен в програмния продукт FLAC Slope.

10 ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

На базата на резултатите от направените по-горе изследвания могат да се направят следните изводи и заключения относно свойствата и поведението на скалните откоси в открити рудници и кариери, с оглед на тяхната устойчивост:

- Скалните откоси са структурни системи, които се характеризират с дуално поведение по отношение на тяхната устойчивост, определящо се от съотношението на размерите на елементарните скални блокове, оформени в тях и кинематично потенциалния обхват

на процесите на обрушване.

- При съпоставимост между тях устойчивостта на откосите е структурно контролирана. Това преопределя обрушване на единични или групи скални блокове по пукнатини по добре дефинирани основни кинематични модели (линейно хлъзгане, клиново хлъзгане и флексурно преобръщане), при условия на неблагоприятна ориентация на откоса спрямо тази на пукнатините или техните пресечници и наклони по-високи от якостта на срязване по тях.
- Обща качествено-количествена оценка за структурно контролираната устойчивост може да се получи от използването на приложими класификационни кхеми за качествата на скалния масив – RMR (Rockmass Rating); SMR (Slope Mass Rating) и GSI (Geological Strength Index). Тяхното съвместно използване обикновено дава представителна оценка за състоянието на скалните откоси, която може да прави на предварителни етапи при проектиране на откосите.
- Кинематичните (стереографски) методи на Markland за оценка на структурно контролираното обрушване могат да бъдат основен инструмент за детайлна оценка на състоянието на съществуващи или проектни скални откоси в обхвата на единични или групи стъпала. Посочените модели са базови, като те не отчитат редица фактори за устойчивостта като порен натиск в пукнатините, сеизмични въздействия, наличие на остатъчни кохезионни мостове. При наличие на такива усложняващи фактори, устойчивостта на вече дефинираните от структурния модел единични или групи блокове трябва да се оценява самостоятелно чрез методите на гранично равновесие.
- При значително надвишаване на кинематично потенциалния обхват на процесите на обрушване над размерите на елементарните скални блокове в масива, той трябва да се разглежда като квазиеднородна среда, чиито свойства се определят от съвкупността на свойствата на скалната матрица (ненарушената скала) и мащабния ефект, определен от характера на блоковост, броя на пукнатинните групи в масива, тяхната ориентация и свойствата по пукнатините.
- Като най-подходящ и универсално приложим за условията на скалните масиви в съвременната практика е обобщеният якостен модел на Hoek-Brown, който оценява мащабния ефект чрез показателя GSI. Оригинално неговото определяне е количествено-качествено и се основава на визуална оценка на вида и степента на напуканост и състоянието на пукнатините в масива. Напоследък системата е доразвита чрез включване в оценките на редица обективни числени показатели, основаващи се измерване на гъстотата на пукнатините, показателя RQD, числена оценка на състоянието на пукнатините по установени класификационни скали (RMR). Тяхното използване подобрява значително точността на оценките, като трябва да се има предвид, че някои от тези показатели могат да бъдат подвеждащи (напр. RQD).
- Тъй като свойствата на скалната матрица и характера на напукаността на масива имат случаен характер, то при оценка на техните свойства се препоръчва подхода на Еврокод 7 по отношение на статистическа оценка на характеристичните стойности на

показателите или техните компоненти.

- При оценка на устойчивостта на откосите в кариери и рудници е подходящо да се оценява влиянието на взривните работи върху състоянието на масива, като, както беше установено при настоящото изследване, то може да бъде съпоставимо със сеизмичните ускорения за района.
 - Съвременните числени методи за оценка на устойчивостта, съотнесени към аналитичните методи на гранично равновесие, предоставят възможности за отчитане на по-голям брой показатели за свойствата на масива, вкл. неблагоприятно ориентирана линейна група пукнатини спрямо откоса. Тази оценка може да се доразвие и с оценка на неблагоприятно ориентирани клинови повърхнини, получени като пресечници между иначе неопасни пукнатинни групи. Същевременно аналитичните методи, макар и значително по-прости, позволяват прилагане на инженерна експертност при оценка на потенциалните повърхнини и зони на хлъзгане и свойствата по тях, което позволява намиране на по-неблагоприятни решения по отношение устойчивостта на скалните откоси. От тази гледна точка, се препоръчва решенията с числени методи да бъдат частично или пъ-пълно „верифицирани“ с аналитични изчисления основани на инженерна експертиза. ПРИНОСИ

На базата на представените в дисертационния труд изследвания и анализи могат да бъдат формулирани следните приноси:

1. На базата на системния подход е извършено концептуално характеризиране на скалните откоси са като структурни системи. Формулирани са основните принципи и подходи, които трябва да се прилагат при тяхното изследване. Обобщено е тяхното двойствено поведение с оглед на тяхната устойчивост в зависимост от съотношенията на формата и размерите на „елементарния“ (средния) структурен блок обхвата на процесите на обрушване в него.
2. Направен е обстоен и критичен преглед на съществуващите методики (полеви, качествени и количествени) за оценка свойствата на скалния масив, тяхната взаимовръзка и съвместната им приложимост за целите на оценката на устойчивостта на скални откоси в открити рудници и кариери. В светлината на дуалното поведение на скалните откоси са разгледани методите за оценка на устойчивостта (кинематични, аналитични и числени), като са сравнени техните възможности и приложимост.
3. Приложен е комплекс от съществуващите методи при изучаване на реални обекти и оценка на якостните свойства на скалните масиви, като са получени са нови данни за структурата и свойствата на скалните откоси на кариера „Люляката“ – Девня и Рудник „Асарел“.
4. Получените резултати за са използвани за оценка на устойчивостта на съществуващи и проектни скални откоси и в светлината на структурно контролираните обрушвания на скални блокове и в условията на квазиеднородна среда. Направени са сравнения на получените резултати и оценка на приложимостта на използваните подходи и методи. Показана е значимостта на инженерната експертиза при съвместното използване на числени и аналитични методи.
5. Изготвената разработка може да се използва като методическа основа за изготвяне на нормативна база за оценка на устойчивостта и проектиране на

скални откоси.

СПИСЪК НА НАУЧНИТЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМАТА:

- Косева, Ч., А. Лаков, Д. Карастанев. 1984. Изследване на напрегнатото състояние и устойчивостта на бортовете на рудник „Елаците“ в процеса на извършване на изкопните работи. Год. ВМГИ, т. XXX (1983-1984), св. 4, 137-145.
- Желев, В., А. Лаков, Г. Айданлийски, Т. Георгиева. 2011. Геологоструктурни и инженерногеоложки изследвания в кариера "Юртдере" (Димитровград). I. Геологоструктурни изследвания. Год. МГУ, т. 54, св. I, Геология и геофизика, 2011, 33-38.
- Лаков, А., В. Желев, Г. Айданлийски, Т. Георгиева. 2011. Геологоструктурни и инженерногеоложки изследвания в кариера "Юртдере" (Димитровград). II. Свойства на скалния масив. Год. МГУ, т. 54, св. I, Геология и геофизика, 2011, 139-144.
- Lakov, A., S. Stoynev. 2013. Defining Hoek and Brown failure criterion for rocks from simple strength laboratory tests data. Proc. of the XII Nat. Conf. of the open pit and underground mining of minerals. 26-30 June 2013. Varna, Bulgaria. 218-225.