

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ОПАСНОСТТА ОТ СКАЛНИ УДАРИ ПРИ РАЗРАБОТВАНЕТО НА МАДАНСКОТО РУДНО ПОЛЕ

Венцислав Иванов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. Извършени са комплексни изследвания за определяне на опасността от скални удари в пет подземни рудника на Маданското рудно поле. Приложен е съвременен методологичен подход за идентификация и определяне на рисковите геомеханични фактори, обуславящи индуцирана сеизмичност на системата "Вместващ масив/ Подземни изработки". На база комплексна оценка на получените резултати е прогнозирана опасността от възникване на скални удари и е извършено класиране на изследваните рудници по категория на геомеханичния риск.

RESEARCH IN THE RISK OF ROCK BURSTS AT THE MADANSKOTO ORE FIELD MINING

Ventsislav Ivanov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

ABSTRACT. Complex researches are made in order the risk of rock bursts in five underground mines of Madanskoto Ore Field to be determined. A modern methodological approach is applied for identification and determination of the risky geomechanical factors causing the induced seismicity of the Host Mass/Underground Workings System. The risk of rock burst origin is predicted on the basis of the complex assessment of the results obtained and classification of the mines researched is made on the category of the geomechanical risk.

Увод

В минната наука и практика с определението "динамични прояви на скалния натиск" се описва всяко разрушаване с взривоподобен характер – от "стрелянето" на парчета скала от стените и забоя на изработките, до същинските скални удари, разрушаващи обширни участъци от масива и изработките в него.

Определението е коректно, тъй като в механизма на тези явления съществена разлика няма. Те се различават най-вече по магнитудите си, които при скален удар могат да достигнат до 5^{та} степен по скалата на Рихтер [5, 11].

Главните причини за развитие на типичен скален удар са естествено напрегнат масив, съдържащ пренапрегнати зони на концентрация на напрежения (индуцирани от минни работи) и изграждащи го здрави, крехки и еластични скали, способни да се освобождават взривоподобно от акумулираната в тях деформационна енергия.

С увеличаването на дълбочината на експлоатация, скалните удари, в описаните условия, са често явление и се превръщат в основна опасност за персонала и режима на разработване на находището.

Обект на настоящото изследване са пет рудника от Маданското рудно поле, в някои от които, с навлизането на добива в дълбочина, са наблюдавани динамични явления. На база лабораторни и *in situ* изследвания, публикувани данни и устни съобщения е извършен комплексен анализ на геомеханичната обстановка в проблемните находища.

Кратка геоложка характеристика на Маданското рудно поле

Маданското рудно поле е разположено в най-южната част на Централни Родопи, то е с площ 300 km² и включва 50 находища и 40 рудопроявления [1]. Находищата са плутогенно-хидротермални, като залежите са жилни и метасоматични. Рудните жили са стръмно западащи (70° - 90°), често прекъсващи се, с брекчовиден строеж и ясни контакти. Преобладават жилите с дебелина до 3 m, но има и такива, с дебелина до 10-15 m. Характерна особеност са апофизните им отклонения, със значително количество руда в тях и кондиционно орудяване.

Вместващият масив е изграден основно от метаморфни свити скали, представени от разновидности гнайси – ивичести, дребнозърнести, инжекционни, гранитогнайси, амфиболити и пегматити. Масивът е претърпял интензивни тектонски въздействия и е пресечен от четири системи разломи, от които основните рудовместващи са т.н. Северозападни разломи (A=320° – 340°).

Подземните води в рудниците са обособени в два водоносни хоризонта. Първият е в кватернерните наслаги, захранва се от инфилтриращи се повърхностни води, има непостоянен дебит и е без съществено значение за хидрогеоложките условия на рудното поле. Вторият водоносен хоризонт е развит в разломите и рудоносните зони на метаморфния комплекс и е основен за

находищата. Неговият дебит също е колеблив, за отделните рудници, и се движи средно между 9 и 24 l/s.

На фиг. 1 е показана част от Маданското рудно поле, с разположение на рудниците, обект на изследването.

I. Изследвания и анализи на получените резултати

I.1 Определяне степента на ударност на скалите

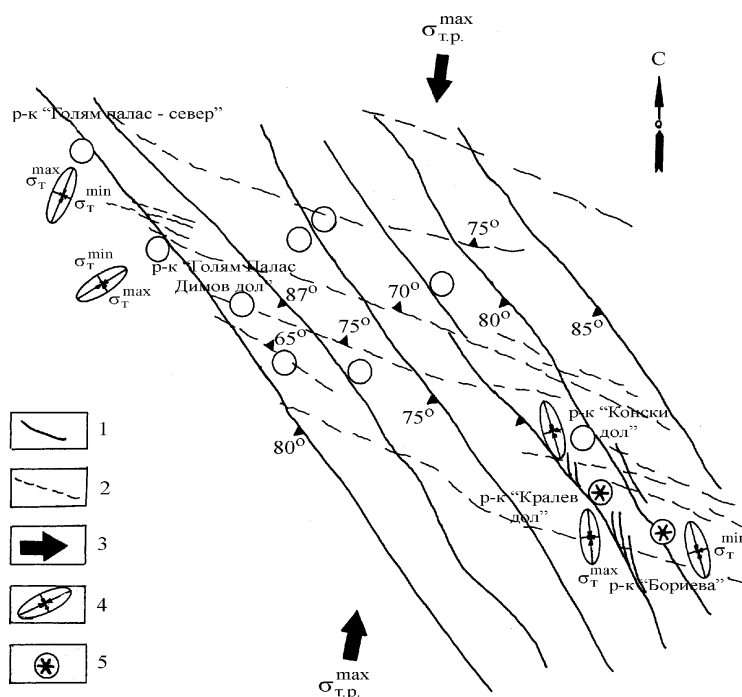
За целта се използват различни скали на удароопасност, в които, чрез зависимости, базирани на лабораторно определяните якостно-деформационни параметри, изграждащите скали се категоризират по склонност към скални удари.

Основните характеристики, използващи се в съвременната световна практика [3, 4, 5], са:

- Плътност на деформационната енергия $SED = \sigma_c^2 / 2E \quad [kJ/m^3]$
- Якостен индекс $RSI = 3\sigma_{max} / \sigma_c \quad 1.1.1$
- Напреженов индекс $SI = \sigma_c / \gamma H$
- Индекс на крехкост $BI = \sigma_c / \sigma_t$

където: σ_c е якост на едноосов натиск [MPa]; E – модул на Юнг [MPa]; σ_{max} – максимално главно напрежение [MPa]; γH – тегло на стълба на горележащи скали [MPa] и σ_t – якост на чист опън [MPa].

На база собствени [4, 6, 7] и публикувани [1, 2] резултати от лабораторни определяния на физикомеханическите свойства на образци от изследваните находища е извършена оценка и категоризиране на скалите по описаните критерии. Резултатите от тези изчисления са дадени в таблица 1.



Фиг. 1 Разположение на изследваните рудници
1 – рудоносни разломи; 2 – безрудни разломи; 3 - разпределение на регионалното поле на напрежения; 4 – локални полета на напрежения; 5 – реализирани налични явления

Таблица 1.

Склонност на скалите към удароопасност

Рудник	Критерий	$SED \quad [kJ/m^3]$	RSI	SI	BI
“Голям палас – север”		100	0,37	8,35	6,75
“Голям палас, Димов дол”		132	0,42	6,13	6,6
“Конски дол”		154	0,49	7,2	7,8
“Кралев дол”		173	0,49	6,35	12,3
“Бориева”		176	0,59	6,42	12,6

Изграждащите скали във всичките пет рудника са здрави, крехки и еластични, способни удароподобно да се освобождават от натрупаната в тях деформационна

енергия. Най-висока удароопасност имат скалите от рудници “Бориева” и “Кралев дол”, в които по рейтинговата скала на Wang [3], за плътност на

деформационна енергия (SED), потенциала им за опасност от скален удар е най-висок. В останалите рудници енергонасищането, обуславящо потенциален скален удар се изменя от ниско ("Голям палас – север"), умерено ("Голям палас, Димов дол"), до средно ("Конски дол").

По якостният индекс (RSI) на Hawkes [12] скалите в рудници "Бориева" и "Кралев дол", а и "Конски дол" са съответно с висок и умерен рейтинг, докато тези в рудници "Голям палас-Север" и "Голям палас-Димов дол" са със среден потенциал.

Параметърът напреженов индекс (SI), за определяне на удароопасността, предложен от Yoon [5] като отношение на $\sigma_c / \mathcal{H}$ в областта на тунелостроенето е модифициран от нас. Ние възприемаме подхода и рейтинговата скала на автора, но разполагайки с големината на измерените напрежения сме модифицирали критерия чрез съотношение между $\sigma_c / \sigma_{\max}$. Получените резултати категоризират потенциала на всички рудници като достатъчен за т. н. "мек" скален удар, т.е. скален удар, при който разрушената зона е ограничена.

Накрая, най-склонни по индекс на крехкост (BI) са пак скалите от рудници "Бориева" и "Кралев дол" ($BI > 10$), докато в останалите рудници удароопасността по крехкост е от ниска ("Голям палас-север") до средна ("Голям палас, Димов дол" и "Конски дол").

1.2 Структурни характеристики на скалите

Геомеханичният статус на масива се характеризира с т.н. параметри на състоянието, които са от две групи. Първите са физикомеханичните свойства на ненарушените скали, определени чрез лабораторни изпитвания. Вторите характеризират естественото механично състояние на масива и се определят чрез многопараметрови геомеханични класификации, за получаване на т. н. интегрални характеристики, даващи реалните му свойства, с отразяване на неговата нарушеност [8].

Структурните характеристики на находищата са определени чрез RMR системата на Биенявски [9], на база анализ на публикувани [1, 7] и собствени [4, 6, 7] данни от изследвания. Използвани са три групи параметри – RQD, RMR и GSI. Резултатите за нарушеността (RQD), качеството (RMR) и реалната якост (GSI) на масива в отделните рудници са дадени в таблица 2.

При оценката на структурните свойства на масива, в известните публикации, неговата нарушеност и "качество" (клас) се оценяват чрез параметрите RQD и RMR [5, 10, 15].

Таблица 2.

Интегрални характеристики на масива

Параметър Рудник	RQD [%]	RMR	GSI
"Голям палас-север"	72	63	58
"Голям палас - Димов дол"	74	62	57
"Конски дол"	70	65	60
"Кралев дол"	77	67	62
"Бориева"	83	73	68

В случая, се въвежда един нов показател - GSI (геоложки индекс за якост) [9], отразяващ влиянието на горните два върху якостта на реалния, нарушен масив. От резултатите показани в таблица 2 и предоставените ни сведения* за реализирани динамични явления в рудниците установено, че те са настъпили в масиви с $RMR > 61$ (II клас масиви), $RQD > 70\%$ и $GSI > 60$.

1.3 Изследване на напрегнатото състояние на масива

За определянето на напрегнатото състояние са извършени следните аналитични и експериментални изследвания:

- Реконструкции на естествените полета на напрежения

По данни от изучаването на тектониката на разкъсване, чрез методи, базирани на анализ на елементите на залягане на системите тектонски разломи [14, 6] е определено разпределението на регионалното поле. Впоследствие чрез метода за реконструкция на съвременните полета, основан на данни от инклинометрията на проучвателните сондажи, прокарани от повърхността [16] са определени локалните полета на изследваните рудници.

- In situ измервания на напреженията в масива

Магнитудите и ориентацията на действащите напрежения са определени чрез метода на частично разтоварване [4, 6, 7]. Извършени са измервания в рудник "Голям палас-север" (две замерни станции) и рудник "Кралев дол" (4 замерни станции).

Извършените реконструкции на палеополето на естествени напрежения установяват, че напрегнатото състояние е от тектонски генотип и се обуславя от взаимодействието между гравитационна (вертикална) и тектонски (хоризонтални) компоненти. Изследването на разпределението на тектонските компоненти на регионалното поле показва, че максималният тектонски натиск $\sigma_T^{\max}$ е действал субмеридианно и в геоложката история, ориентацията му е била в диапазона $\alpha \sigma_T^{\max} = 346^\circ - 30^\circ$. Изменението на направлението на минималното тектонско напрежение (на относителен опън) е било с диапазон $\alpha \sigma_T^{\min} = 256^\circ - 300^\circ$. Резултатите от това изследване са показани на фиг. 1 и

* Сведенията за наблюдаваните динамични явления са ни предоставени от маг.инж. Петър Петров – почетен член на БМГК, тогава Зам.-директор ПТБ, МОК "Горубсо"

са обозначени със стрелки, показващи ориентацията на тектонските компоненти. Получените разпределения, макар и важни, са параметри на палеополето. Характеристиките на съвременните полета в отделните рудници са получени, както бе отбелязано, чрез реконструкцията им, по данните от инклинометрия на проучвателните вертикални сондажи, от повърхността (добив все още липсва). Получените резултати са показани също на фигурата, чрез сеченията на елипсоидите на полетата им, за всеки от изследваните рудници.

Резултатите от разпределенията на напреженията на регионалното и локалните полета са в общо съгласие. Това обстоятелство е използвано за определяне на местата на замерните станции и рудниците, в които са извършени измерванията на действащите напрежения. Експерименталните резултати за магнитудите на главните напрежения са показани в Таблица 3.

Анализът на данните потвърждава тектонския тип на полетата на напрежения, във всичките изследвани рудници. Всички измерени гравитационни компоненти са отклонени от вертикалната ос от 10^0 - 24^0 , също типично за полетата от тектонски генотип и надвишават теглото на горележащите скали 1,5 – 2,0 пъти. Полетата на напрежения в рудниците разположени на север (“Голям палас-север” и “Голям палас – Димов дол”) са с по-нисък интензитет от тези на юг – “Бориева”, “Кралев дол”, “Конски дол”. Максималното тектонско напрежение в северните рудници е съизмеримо с гравитационното, докато в тези на юг, то е значително по-голямо от вертикалното.

Относително малкото разстояние между изследваните рудници позволява съвместна интерпретация и анализ на всички получени експериментални резултати [9]. Напрегнатото състояние на масива е нехомогенно, с различни съотношения между магнитудите на σ_1 , σ_2 и σ_3 , изменящо се от 2,7:1,4:1, за северните до 5:1,9:1 (рудник “Кралев дол”, респ. р-к “Бориева”), където тектонските компоненти доминират. Известно е друго изследване [13] за определяне напрегнатостта на масива, чрез оценка нивото на максималното напрежение по дискуването на сондажната ядка. Оценката е за рудник “Бориева” и резултатът от него е съпоставим с получените от нас.

I.4 Техноложичин въздействия, обуславящи индуцирана сеизмичност във вместващия масив

Подземните изработки нарушават целостта на масива и равновесието на естественото му напрегнато състояние. С това се индуцира ново разпределение на действащите напрежения. Интензитета на индуцираното поле е в пряка зависимост от степента на нарушаването на масива от мрежата различни минни изработки, прилаганата технология на добив, мащаба и режима на експлоатация и конфигурацията на мрежата, спрямо разпределението на естественото поле на напрежения. Индуцираното поле на напрежения и “реакцията” [15] на масива се инициират с прокарването на подготвително-нарезните изработки.

Известни са изследвания на разпределението на напреженията около такива изработки в тектонски напрегнати масиви [14]. В тях е установено, че индуцираното поле на напрежения е с висока сеизмичност и концентрациите на напрежения нарастват до 2,5 пъти, с което се създават условия за интензивни разрушения [14,12].

За оценка на описаните въздействия, на база събрана информация от практиката на рудниците за минно-техническите характеристики на рудните жили, за относителния разход и ефективността на изработките и добиваното количество руда е определен относителния обем на подготвително-нарезните работи, за отделните рудници, в зависимост от конкретните прилагани системи на разработване. Получените резултати, отразяващи степента на техногенното нарушаване на масива са дадени в таблица 4.

II. Рискови фактори и механизъм на взаимодействието им

Потенциалът на системата “Вместващ масив /Подземни изработки” (ВМ/ПИ), обуславящ вероятността за динамични явления, вследствие разработването на залежите в разглежданите рудници, ще се определя от нивото на индуцираната сеизмичност, функция на нейното напрегнато-деформирано състояние (*НДС*).

Общите геомеханични фактори, формиращи *НДС* на споменатата система, установени и описани в текста са:

- Изграждащи скали, притежаващи определена степен на удароопасност;
- Полета на напрежение с високи магнитуди, от тектонски генотип;
- Структурните характеристики на масива за полева оценка на индуцирана сеизмичност;
- Степента на техногенната му нарушеност от мрежата изработки и взривяванията при прокарването им.

Изброените фактори, в своето взаимодействие, формират *НДС* на системата и наред с динамичните наслагвания на различни по магнитуда и ориентация напрежения от взривовите, обуславят конкретните зони на концентрация, в които напреженията значително надвишават якостта на скалите и индуцират появата на сеизмичност.

Индуцираната сеизмичност най-напред се проявява по стените на подготвителните и нарезни изработки, доближаващи зоните на концентрация чрез т.н. “прекурсори” [11] или индикатори [10]. Това са лющенията, отслояванията и “стрелянията” на парчета скала от стените и забоя, дискуването на ядката, увеличен водоприток и др. Индикаторите на сеизмичност предхождат потенциалния скален удар и техният интензитет расте с нарастването на потенциала за неговата проява [11].

В зависимост от мащаба и обхвата на съчетаването на рисковите геомеханични фактори е възможно да се прогнозира механизмите и типа на разрушаване на

масива чрез метода "напреженова траектория" (Stress Path) [8,17]. Приложението на метода е показано на фиг.2.

Таблица 3.

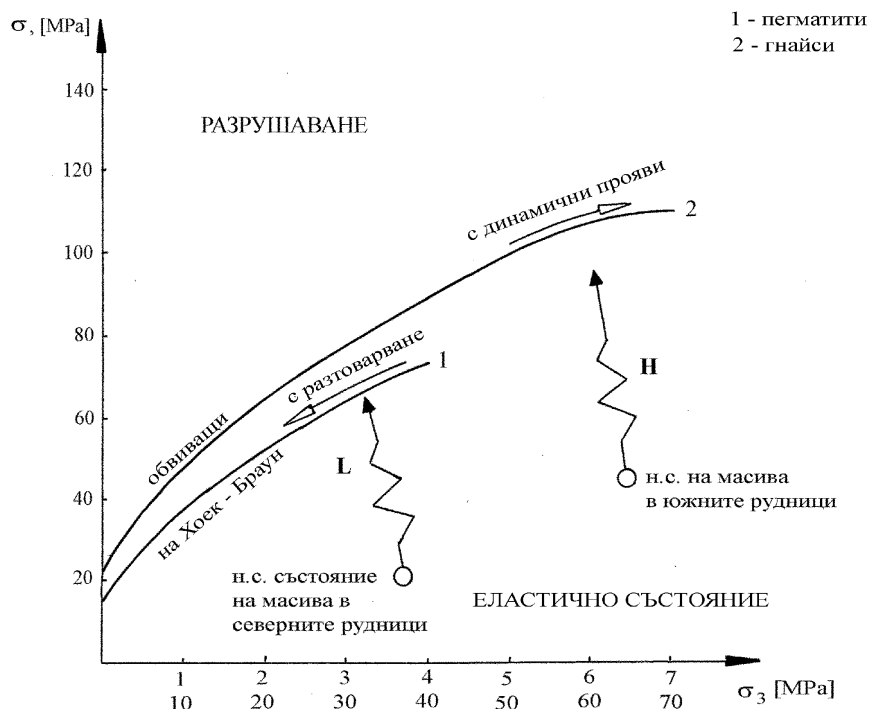
Резултати от измервания *in situ* на напрежнатото състояние

Главни напрежения	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_3 (MPa)	Забележки
Рудници				
"Голям палас-север"	11 - 15	7 - 9	4 - 5	$\sigma_{\max}$ е вертикално
"Кралев дол"	20 - 24	13 - 19	6 - 7	$\sigma_{\max}$ е хоризонтално $A = 360^\circ$

Таблица 4.

Техногенни въздействия върху НДС на системата ВМ/ПИ

Характеристика Рудник	Система на разработване	Дълбочина на минните работи [m]	Добита руда [kt]	Относителен обем на подготвително- нарезните работи [m ³ /kt]
"Бориева"	с магазиниране на рудата	700	6499	21
"Конски дол"	с магазиниране и запълване	300	5071	25
"Голям палас – север"	със слоево обру- шаване	500	5934	30
"Голям палас – Димов дол"	със слоево обру- шаване и запълване на слоевете	500		32
"Кралев дол"	С подетажно обрушаване	500	3747	56



Фиг. 2 Механизми на разрушаване на масива в изследваните рудници

Паспортите на якост (диаграмите на разрушаване) с координати главните напрежения σ_1, σ_3 са изобразени чрез критерия на Хоек – Браун [9] по преобладаващите представени разновидности скали – пегматити в зоната на северните (“Голям палас – север” и “Голям палас – Димов дол”) рудници и за разновидностите гнайси, изграждащи масива в рудниците юг – “Бориева”, “Кралев дол” и “Конски дол”.

Преди подготовката, скалният масив е в еластично (неразрушено) напрегнато състояние $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, - показано на фигурата.

Прокарването на изработките ще наруши това състояние, ще се увеличи разликата $\sigma_1 - \sigma_3$ и ще се формират зони на концентрация, в които ще възникнат тангенциални напрежения, растящи с нарастването на дивергенцията между $\sigma_1 - \sigma_3$. Зоните $\sigma_1 - \sigma_3$ ще се развиват, с развитието на мрежата изработки, до пресичане на обвиващата, с което ще настъпва разрушаване на масива.

Режимът на разрушаване ще е различен в зависимост от съчетаването на рисковите геомеханични фактори, определящи механизмите на акумулиране и начина на освобождаване на деформационната енергия на системата “Вместващ масив/ Подземни изработки”, породена от технологичните операции. Както се вижда от графиката, режимът на разрушаване може да се реализира по две напреженови траектория.

Напреженовата траектория *H* е индикативна за рудниците “Бориева”, “Кралев дол” и “Конски дол”, където системите ВМ/ПИ са в условията на интензивни полета на напрежения, с най-високи физико-механични свойства и най-добри структурни характеристики. При тези дадености системите не са способни да се разтоварват от натрупваната сеизмичност, съпътстваща развитието на мрежата изработки. Процесите на разрушаване най-вероятно ще се развиват внезапно, удароподобно, динамично т. е. ще се реализират скални удари.

Напреженовата траектория *L* е характерна за масивите на северните рудници, които са в по-благоприятни общи геомеханични условия: напрегнато състояние с по-нисък интензитет (разликата $\sigma_1 - \sigma_3$ е по-малка), скалите са с по-лоши структурни характеристики и по-ниски якостно-деформационни показатели. При установените дадености с развитието на технологичните въздействия системата “Вместващ масив/Подземни изработки” ще има псевдопластично деформационно поведение. Това обуславя най-вероятен режим на загуба на устойчивост и разрушаване, като постепенен, на “порции”, с което ще се създават условия за поэтапно разтоварване без динамични явления.

III. Изводи

Описани са и са изследвани основните рискови фактори, обуславящи индуцирана от минните работи

сеизмичност, в подземните рудници на Маданското рудно поле.

За оценка опасността от скални удари е приложена съвременна методология, съдържаща модифициран и нововъведен от нас критерий за удароопасност с възможност за приложение за всички рудници с аналогични геомеханични условия.

Извършените изследвания показват, че в рудници “Голям палас-север” и “Голям палас-Димов дол” потенциалът на системата ВМ/ПИ не създава условия за проява на динамични явления. Обратно, в рудниците “Бориева”, “Кралев дол” и “Конски дол” е установено, че геомеханичните условия, в съчетание с технологичните въздействия обуславят значителен потенциал, за възникване на скални удари от индуцираната сеизмичност. Комплексната оценка на геомеханичния рисков потенциал от скален удар позволява следната класификация на проблемните рудници:

№	Рудник	Категория на геомеханичния риск
1	“Голям палас-север”	нисък
2	“Голям палас-Димов дол”	нисък до умерен
3	“Конски дол”	среден
4	“Кралев дол”	висок
5	“Бориева”	много висок

IV. Заключение

Определението на потенциала на системата “Вместващ масив/Подземни изработки” за внезапни, неконтролируеми разрушавания на масива е от съществено значение за условията на работа, безопасността на персонала и икономиката на рудника.

Изследванията, идентификацията и оценката на рисковите фактори, обуславящи критично състояние на системата ВМ/ПИ, имат две приложения при геомеханичното осигуряване на добива:

- Прогнозиране на опасността, мащаба и местоположението на вероятен скален удар;
- Планиране на ефикасни и ефективни технологични решения за превенция, минимизиране на последиците и предотвратяване на инциденти и/или катастрофи от индуцирана сеизмичност, в зависимост от интензитета и дълбочината на експлоатация.

Литература

1. Димитров Р. и др. –Оловно-цинковите находища в България, ДИ “Техника”, С, 1988
2. Христов Г. и др. –Опазване на съоръженията и обектите от вредното влияние на подземните минни работи, ДИ “Техника”, 1978
3. Wang J. A. et al –Comprehensive prediction of rockburst based on analysis of strain energy in rocks « Tunelling and underground space technology, 2001

4. Андреев Г., Иванов В. –Има ли опасност от скални удари в "Горубсо". Методика за оценка и анализ, сп. Минно дело и геология, 1991/5-6
5. S.M.Lee et al – Analysis of rockbursts that have occurred in a waterway tunnel in KOREA, Simposium SINOROCK 2004
6. Иванов В. –Геомеханична оценка на рудник "Димов дол" (Маданско рудно поле).
7. Иванов В., Андреев Г., Славова С. – Експериментално определяне на напреженията в стените на подземна изработка в рудник "Димов дол" – "Горубсо", сп. Минно дело, 5, 1989
8. Иванов В. –Геомеханична логистика на подземния добив на полезни изкопаеми, Сб. Доклади I^a научно.техническа конференция по подземен добив на полезни изкопаеми, Девин, 2008
9. Hoek E. T. "Rock Engineering" A. A. Balkema, Rotterdam, 2001
10. Kozirev A. A. et al – The geodynamic evolution of the geological medium in Area of Large – Scale Mining, Proceedings of 21stWorld Mining congress, Krakow, 2008
11. Szwedzcki T. – Precursors to Rock Mass Failure in Underground Mines, Arch. Min Sci, vol 53 (2008)) 3
12. Hawkes I. – Significance of in situ Stress Levels, Proc. Int congress of Rock Mech., vol 3
13. Парашкевов Р., Петров П. – Опит за експресна оценка на напрегнатостта на масива около подземни изработки, сп. Рудодобив, бр. 7/1979
14. Турчанинов И. А. и др.- Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок, Наука, 1978
15. Budavari S. – Rock Mechanics in Mining Practice, SAIMM, Johannesburg, 1983
16. Иванов В. - Геомеханично осигуряване на подземния добив на полезни изкопаеми в Република България, Сборник на трудови ПОДЕКС '07, Пробищип, Македония, 2007.

Препоръчана за публикуване от Катедра "Подземно разработване на полезни изкопаеми ", МТФ