



**УВЕЛИЧАВАНЕ НА РЕЗОЛЮЦИЯТА ПРИ МЕТОД ЗА ОЦЕНКА НА СТАБИЛНОСТТА НА МАСИВА  
„MATHEW'S STABILITY GRAPH" С ПОМОЩТА НА БЛОКОВО МОДЕЛИРАНЕ В УСЛОВИЯТА НА  
РУДНИК „ЧЕЛОПЕЧ“**

**Иван Георгакиев<sup>1</sup>, Мартин Добрев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Дънди Прешъс Метълс Челопеч, България, Ivan.Georgakiev@dundeprecious.com

<sup>2</sup>Дънди Прешъс Метълс Челопеч, България, Martin.Dobrev@dundeprecious.com

**USING BLOCK MODELLING TO IMPROVE THE RESOLUTION OF THE MATHEW'S STABILITY GRAPH  
METHOD FOR ROCK MASS ASSESSMENT IN THE CHELOPECH UNDERGROUND MINE**

**Ivan Georgakiev<sup>1</sup>, Martin Dobrev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Dundee Precious Metals, Bulgaria, Ivan.Georgakiev@dundeprecious.com

<sup>2</sup>Dundee Precious Metals, Bulgaria, Martin.Dobrev@dundeprecious.com

**ABSTRACT**

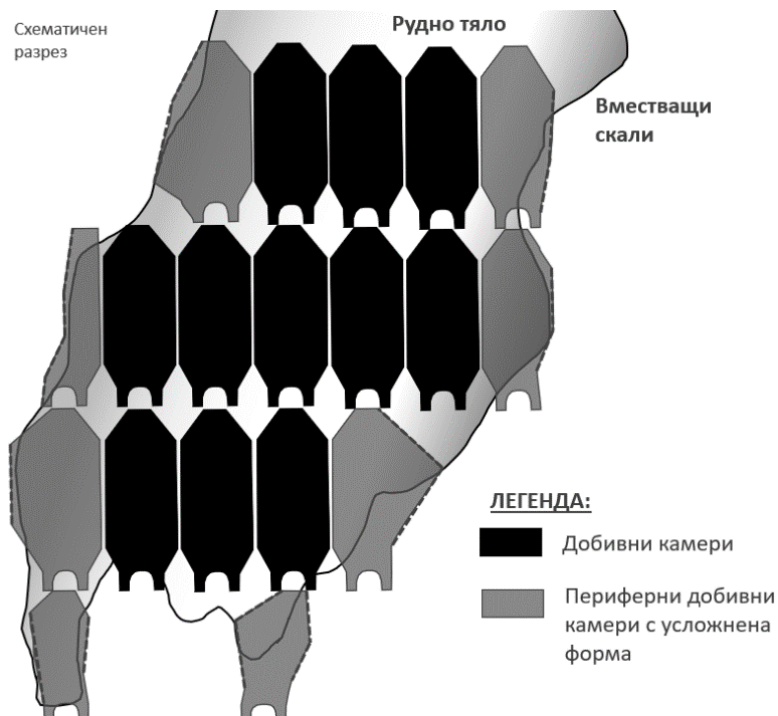
*The empirical method of Mathew's stability graph is used to assess the size and evaluate the stability of the rock mass in the vicinity of the open stopes within the Chelopech mine. This study aims to increase the resolution of the applied method by including all available structural-geological data. Currently, the method used is informed by a limited amount of structural disturbance data in the rock mass, which provides a summary estimate for each designed stope wall. In the present study, block modeling is utilized, allowing for a detailed assessment of stability, even for stopes with complex design.*

**Въведение**

В находище „Челопеч“ размерът на отделните рудни тела от високо сулфидизиран тип минерализация варира в широки граници. Рудните зони от горните хоризонти на находището са поддържани с конусообразна форма, стръмно затъващи на югоизток. В най-високите части на рудните тела минерализацията е масивна до полумасивна, като слизайки в дълбочина тя изклонва в по-тесни тела и преминава към жилна, щокверкова и впръсната минерализация съпроводена с изтъняване на околорудния кварц-серицитов ореол до лещообразни и жило подобни тела. Долните части на рудните тела имат генерален тренд, запад-изток.

Към момента методът на разработване на находището е камерна система с последващо запълване, която заменя подетажното обрушаване през 2004 г. С погасяване на запасите в големите рудни тела, все по-често се налага добив в близост до границата на рудното тяло или в усложнена тектонска обстановка. Минерализацията с рязко променящи се граници налага все по-сложна форма на добивните камери. За оценка на геомеханичния риск в условията на рудник „Челопеч“ се използва Mathews stability graph, който е основен метод при оразмеряването на проектните добивни камери и спомага вземането на решения, свързани с безопасността и геомеханичния риск.

На Фиг.1 е представена обобщена схема на някои от вариациите във формата на проектните добивните камери, които попадат в периферията на рудно тяло и се отклоняват значително по форма, а понякога и по размер от проектно заложените параметри на добивни камери в находището. Тези промени във формата на стените на проектната камера трябва да бъдат съобразени със съществуващите структурни нарушения в по-голям детайл.



Фиг.1 Схематичен разрез на добивни камери и промяна на формата им в периферията на рудното тяло (в сиво).

Отделни обеми на проектната добивна камера могат да са в усложнена геомеханична обстановка, като това може да остане незабелязано, ако разглеждаме обобщени данни за цялата площ на стена от камерата. Настоящото изследване се стреми да увеличи разделителната способност на използваната методика за оценка на геомеханичния риск, като използва голяма част от структурно-геоложките данни на сондажите и подземното структурно-геоложко картиране.

### Геомеханична оценка и данни

За определяне на геомеханичните характеристики на проектни добивни камери в стръмно затъващи рудни тела в находище „Челопеч“ се използва графическият метод (диаграма на устойчивостта), известен като Mathews stability graph (Mathews, 1981). Методът се прилага за определяне устойчивостта на открити добивни площи и оценка необходимостта от крепене. Той обвързва геомеханичните условия, изразени чрез интегралния показател ( $N'$ ) и геометрията на проектираното добивно пространство, отчетено чрез хидравличния радиус (HR). В интегралния показател  $N'$  участва модифицираната оценка на тунелното качество на масива ( $Q'$ ). При определяне на геомеханичните показатели се отчитат реалните характеристики на масива, оказващи влияние върху бъдещи минни дейности в него. Използва се събраната до момента база данни от реалните характеристики и поведение на масива в различните блокове. Това включва отчитане на естествените нарушения в масива и по-конкретно интензивност на напукване, грапавост и степен на изменение на стените от нарушенията, наличие на запълнение и оводненост. Показателят за качеството на масива по Deere (RQD), отнесен към класификационния параметър, характеризиращ броя системи пукнатини  $J_n$ , дава относителна представа за размера на естествения структурен блок. Отношението на параметрите  $J_r$  и  $J_a$  отразява сцеплението между стените на нарушенията или якостта на срязване, като в общия случай е взета най-неблагоприятната система нарушения, влияеща върху качеството на масива.

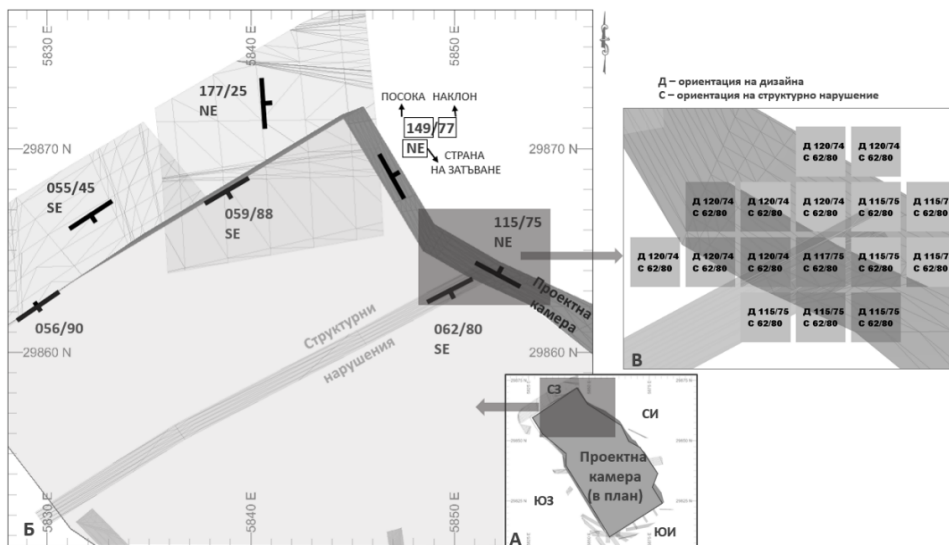
Настоящото изследване има за цел да избегне обобщаването на структурните данни въвеждани при изчисляване на графичния модел на отделните площи от добивното пространство

свързани с изчисляване на фактора  $Q'$ , коригирания фактор за ориентация на нарушенията – В и фактор - С отчитащ възможността за нарушаване устойчивостта на стената от действието на гравитацията.

Фактор - А отчитащ индуцираните напрежения в масива около добивното пространство се задава под обобщена форма за всяка отделна стена. Стойността на фактора се определя като се взема минималната якост на образеца с максималните индуцирани напрежения

За целите на настоящото изследване двойният запис на структурните нарушения е трансформиран в троен, като от **страна на затъване/наклон** преминава в **посока/страна на затъване/наклон**, по този начин се премахват стойностите в азимута от  $180^\circ$  до  $360^\circ$ . Така организирани данните позволяват еднозначно да се стигне до „неблагоприятният ъгъл“ между стената на проектната камера и структурните нарушения. В изчисленията се вземат предвид, както ъглите на азимута, така и наклона на разглежданите повърхности. На Фиг.2 може да се проследи процеса на трансформация от тримерни повърхности в локален блоков модел.

При описанието на сондажна ядка от проучвателното и експлоатационното диамантно сондиране, RQD данните се събират и валидират преди да влязат в геоложката база данни. RQD данните се привързват към местоположението на сондажите, като са съобразени с началото, параметрите и инклинометрията на всеки сондаж. Базата данни позволява информацията да се изведе като облак от точки с координати, което ги прави подходящи за интерполация в блоков модел. Структурните измервания се събират и дигитализират от геолозите към технически служби. Обработката и геомеханичният анализ се извършва от звено геомеханика към технически служби в ДПМЧ.



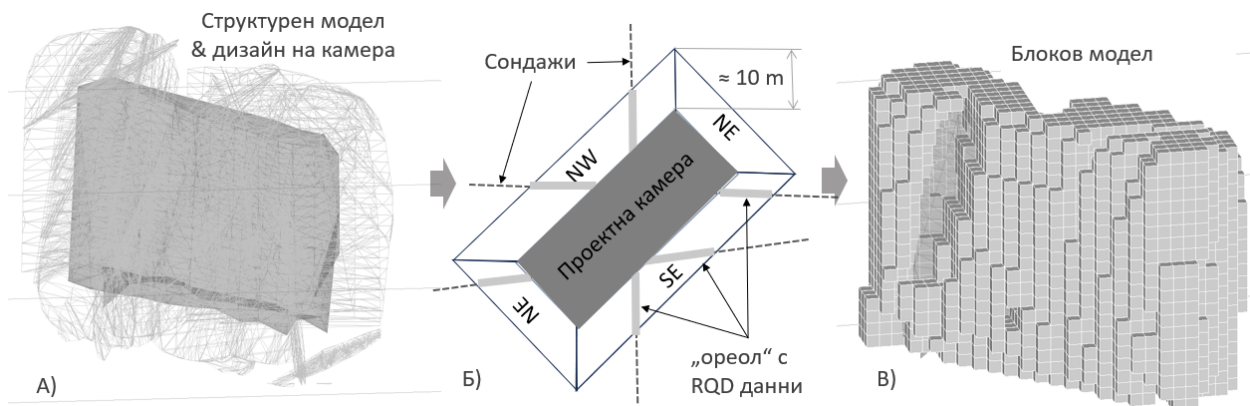
Фиг.2 Данни с ориентацията на структурни нарушения и проектна камера трансформирани в блоков модел

### Методология

От 2012 г. в находище „Челопеч“ се поддържа триизмерен структурен модел, като всяко нарушение, измерено при подземното геоложко картиране, е дигитализирано като отделна повърхност със специфична ориентация в пространството (Добрев и др., 2014). Настоящата методика използва структурния модел като основен източник на информация при геомеханичната оценка на проектните добивни камери. Структурният модел се поддържа на всекидневна база в използвания минен софтуер (Datamine®).

Както бе споменато по-горе, към момента, за всяка стена на проектната добивна камера се използва една константна ориентация на най-неблагоприятната структура в близост. За да се детайлизира геомеханичната оценка при стени с по-сложен дизайн е използван геоложки блоков модел,

който стандартно се използва за оценка на ресурси и запаси. Създаденият модел разделя обема на камерата на кубчета със страна 1m. Центровете на блоковете представляват облак от точки, като към всяка точка освен координати, в табличен вид се съдържа информация за ориентацията на най-близките до всеки блок повърхности. Дизайнът на проектната добивна камера и структурните нарушения (Фиг.3А) се трансформират в отделни облаци от точки, които се използват, за да информират блоковия модел (Фиг.3В), чрез интерполация. Обемът се оценява със стойности от ориентацията на обектите (посока/наклон, Фиг.2). Оценката на блокчето е обратно пропорционална на разстоянията от центъра на всеки блок (IDW) (George,2008). При оценката на всеки блок от модела се използва търсеща сфера с радиус 1,5m от центъра. По този начин се понижава ефекта на по-далечни обекти и добре информираната част от блоковият модел е ограничена до стените на проектната добивна камера.



Фиг. 3 Данни, използвани за генериране на блоковия модел около дизайн на камера

По аналогичен начин в блоковия модел се интерполират и стойностите на „Качество на масива Deere“ (RQD) (Deere, 1988) от сондажната ядка, като се използват само сондажните данни в ореол от 10 m около проектната камера (Фиг. 3Б). В случаите, в които нямаме достатъчно гъста сондажна мрежа, стойността по RQD може да се зададе като константа в блоковия модел (осреднена стойност от по-широк ореол или друг тип експертна оценка). Ако камерата граничи със запълнение, RQD данните от този обем не се вземат предвид.

След като блоковете са информирани с всички необходими данни по примера даден в предишната глава, се пристъпва към итерации за прилагане на Mathews stability graph метода за всеки един блок от модела. Резолюцията от 1m, какъвто е размера на блоковете, позволява да се насочи внимание на отделни части от стените на проектната камера, които попадат в комбинация от неблагоприятни фактори, като RQD или неблагоприятни ъгли спрямо установените структурни нарушения. Тъй като моделът се информира от повече различни, географски привързани данни, то той е подходящ за проектни добивни камери с усложнена форма.

## Резултати

От данните получени след изчисляване на Mathews stability graph (Mathews, 1981) чрез използване на константна ориентация на най-неблагоприятната структура за цялата стена на добивната камера (Таблица 1) и изчисляване с метода на блоковия модел (Таблица 2), е направено сравнение между тях. От съпоставката става ясно, че има разлики в получените резултати за качеството на масива (RQD), фактор В, фактор С и числото на стабилност N'. С използването на хидравличния радиус (HR), който е еднакъв и за двата модела и стойностите от двете таблици, са изготвени и диаграми на устойчивостта (Фиг. 4), от които могат да се видят в коя зона попадат всяка една от стените. Разликата при тези параметри се дължи на това, че първият метод използва

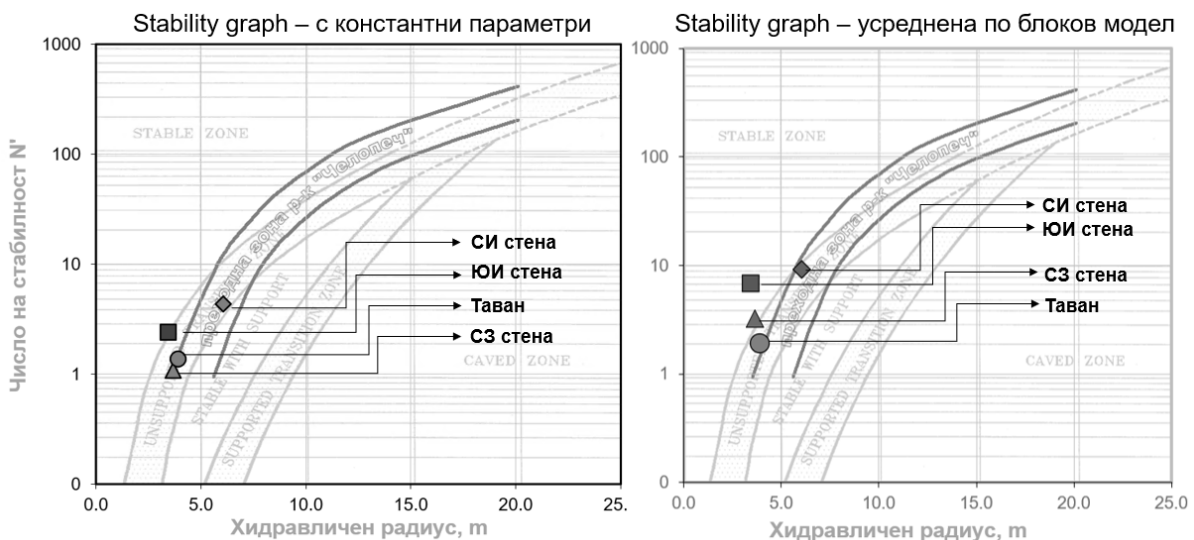
константна структура и ориентация на стената на проектната добивната камера. Те се използват за изчисляването на фактор В и фактор С, които в последствие участват в числото на стабилност N'. При втория метод блоковият модел се информира от ориентираните повърхности на стените на добивната камера и структурните нарушения (посока/наклон). На Фиг. 5А са показани резултатите при използването на константни параметри. Вижда се, че стените са оцветени изцяло в един цвят и попадат в една единствена зона на устойчивост. Например ЮИ стена попада между стабилна и преходна зона без крепеж. Докато при използването на усреднени стойности на блоковия модел (Фиг. 5Б), една конкретна стена (ЮИ) може да попада в различни зони на устойчивост. От тук може да се направи по-задълбочен анализ и да се визуализира в коя част на тази стена може да се очакват усложнени геомеханични условия (Фиг.5В) и да се предвидят мерки за безопасното изземване на рудните запаси.

**Таблица 1.**

Показатели		Стойност			
		С-И	Ю-И	С-3	Таван
Качество на масива по Deere	RQD, МПа	83.2	50	86.3	46
Ф-р за влиянието на индуцираните напрежения в масива	A	0.28	0.38	0.25	0.20
Ф-р за влиянието на ориентацията на нарушенията	B	0.35	0.20	0.27	0.20
Ф-р за отчитане загуба на устойчивост от гравитация	C	2.5	3.0	2.5	2.0
Число на стабилност	N'	4.38	2.42	1.09	1.37

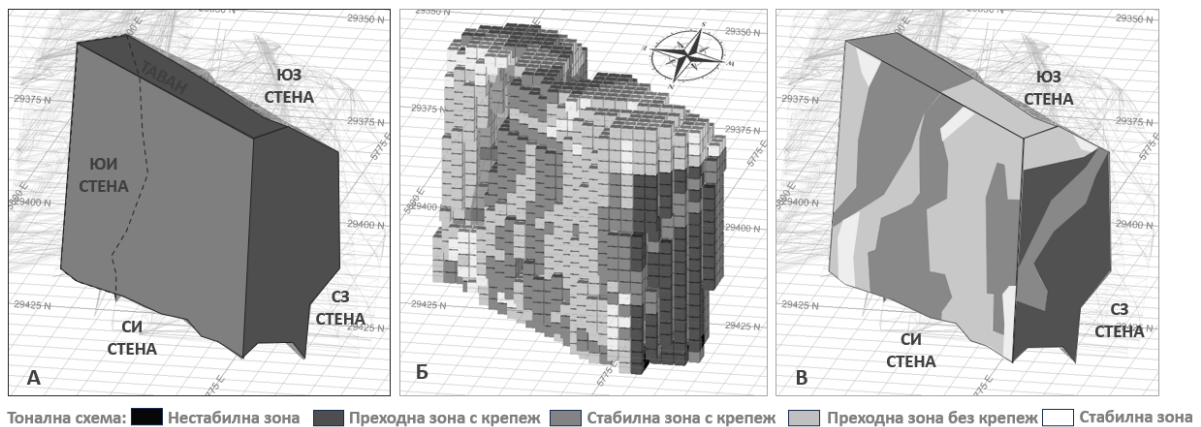
**Таблица 2.**

Показатели		Стойност			
		С-И	Ю-И	С-3	Таван
Качество на масива по Deere	RQD, МПа	74.5	49.5	90.2	52.7
Ф-р за влиянието на индуцираните напрежения в масива	A	0.28	0.38	0.25	0.2
Ф-р за влияние то на ориентацията на нарушенията	B	0.61	0.53	0.60	0.75
Ф-р за отчитане загуба на устойчивост от гравитация	C	3.29	3.25	2.98	3.84
Число на стабилност	N'	9.25	6.78	3.21	1.9



**Фиг. 4 Диаграма на устойчивостта**

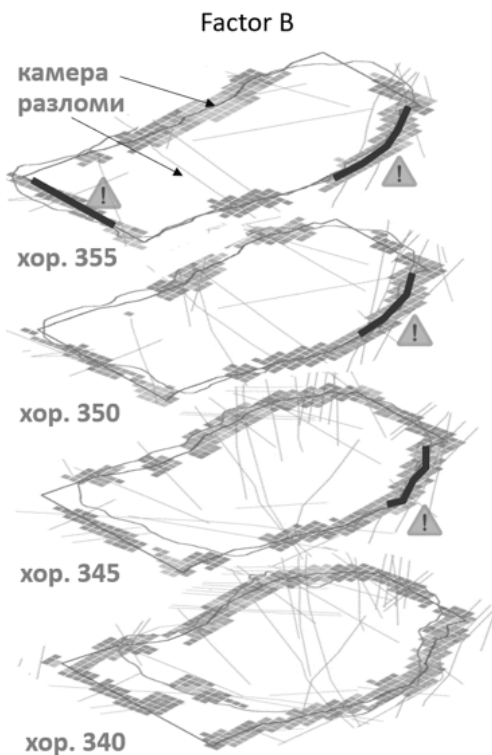




Фиг. 5 Резултати: А) при използване на константа за стена, Б) Резултати от блоков модел, В) Проектна камера с резултати от детайлна оценка

### Заклучение

Настоящата методика обединява геоложки и геомеханични инструменти, като се стреми да повиши резолюцията при изследване на геомеханичния риск в проектните добивни камери или други подземни изработки. Този подход позволява да се оценят много по-комплексно стените на добивните камери, което е доста често срещано при изклиняване на периферните части на рудното тяло. Възможно е използването и на някои междинни параметри, като например „Фактор за влияние



Фиг. 6 Пример с Блоков модел и стойностите на Фактор Б с влиянието на нарушенията спрямо стените на камера по хоризонти.

ориентацията на нарушенията“, за да се дефинират проблемните зони само с оглед на наличните структурни данни (Фиг 6.) При оценката на числото на стабилност с географски привързан блоков модел с резолюция 1m можем да отделим повече от една рискови зони в дадена стена на камера и да се оптимизира крепежната конструкция.

Блоковият модел в използваната методика позволява различни цветови схеми, с които да се визуализират резултатите и да се привържат към повърхността на проектната добивна камера. Това дава възможност на инженерния състав бързо да дефинира евентуални проблемни зони и да ги разглежда в комбинация с друга налична информация.

За периода на изследването са обработени няколко проектни добивни камери. Предизвикателство пред този нов подход е да се сравнят резултатите с изпълнението на добивните работи. Използването на по-голям обем от географски привързани структурни данни позволява да се вземат по-информирани решения свързани със стабилността и оразмеряването на проектни добивни камери.

Този подход може да се приложи към различни подземни изработки. Като ограничения на използвания метод може да се посочи нуждата проектните добивни камери да притежават разнообразни геомеханични данни с нужната организация и гъстота.

С напредване на добивните работи и все по-голямата



нужда от локални геомеханични оценки, настоящият метод има значителен потенциал за развитие в реалната работна среда на рудник „Челопеч“.

#### **Литература**

1. Mathews, K.E., Hoek, E., Wyllie, D. and Stewart, S.B. (1981) Prediction of stable excavation spans for mining below 1000 metres in hard rock, Canada: CANMET, Dept. of Energy, Mines and Resources, DSS Serial No. OSQ80- 00081, DSS File No. 17SQ.23440-0-9020.
2. Добрев, М., Симонски, Н., 2014 Детайлен геоложки структурен модел за целите на добива, геомеханиката и проучването в находище „Челопеч“. Четвърта национална научно техническа конференция технологии и практики при подземен добив и минно строителство, Том 4 Св. I гр. Девин
3. 2024 Datamine Software. Studio UG & RM software help and internet source.
4. Deere, D. U, and Deere, D. W., The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice, “Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM STP 984, Louis Kalkaldie Ed., American Society for Testing and Material, Philadelphia, 1988, pp. 91-101.
5. George Y. Lu, David W. Wong, An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique, Computers & Geosciences, Volume 34, Issue 9, 2008, Pages 1044-1055,