

УДК 622.831:004.925.83

АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ШАХТЫ «ГЛУБОКАЯ» РУДНИКА «СКАЛИСТЫЙ» В КОНТУРЕ ЗАЛЕЖИ БОГАТЫХ РУД С-6 ОКТЯБРЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ*



Н. О. СОЛЮЯНОВ¹,
главный геомеханик,
soluyanovno@normik.ru



А. А. ЦЫБАЛОВ²,
заместитель директора
по горному производству



С. В. КУЗЬМИН³,
руководитель по направлению
«Геомеханика» Дирекции
по планированию горных работ,
канд. техн. наук



А. А. ДАВЫДОВ⁴,
руководитель проектного офиса
Комплексного развития рудника
«Скалистый»

¹ООО «Норникель Технические Сервисы», Санкт-Петербург, Россия
²Заполярный филиал ПАО «ГМК «Норильский никель», Норильск, Россия
³АО «Сибирская угольная энергетическая компания», Москва, Россия
⁴ООО «НН Девелопмент», Москва, Россия

Введение

Геомеханическая модель месторождения представляет собой блочную модель, содержащую литологические данные, параметры прочностных свойств и геомеханических характеристик массива горных пород, слагающих месторождение.

При построении модели в качестве исходных используют данные литолого-структурной модели, геомеханического описания керна скважин и результаты лабораторных испытаний образцов горных пород.

Важным шагом при построении модели на этапе анализа исходных данных является корректная интерпретация входных данных для расчета рейтинговых классификаций породного массива, выделение геомеханических доменов шахтного поля и определение взвешенных значений рейтингов, характеризующих свойства массива в границах доменов.

*В работе принимали участие сотрудники Центра геодинамической безопасности Заполярного филиала ПАО «ГМК «Норильский никель»: директор В. П. Марысюк, начальник отдела М. П. Сергунин, ведущие специалисты А. А. Базин и А. К. Устинов.

Представлен алгоритм расчета показателя измененности стенок трещин по данным картирования керна. Оценена взаимосвязь характеристик трещиноватости массива в системах Бартона и Беняевского. Приведены метод взвешенных категорий для выделения геомеханических доменов, расчет эквивалентных значений рейтингов в доменах.

Ключевые слова: геомеханическая модель, рейтинги массива горных пород, геомеханический домен, методика оценки геомеханических параметров, трещиноватость массива, критерий разрушения Хука – Брауна

DOI: 10.17580/gzh.2023.06.02

Анализ полученных данных

На основе детального геотехнического описания керна скважин (включая ориентированные) выполняют расчет рейтинговых классификаций породного массива. Базовой классификацией является система Бартона (индекс Q).

Численное значение индекса Q определяют по формуле [1]

$$Q = Q_{\text{prime}} J_w / \text{SRF},$$

где $Q_{\text{prime}} = \frac{\text{RQD}}{J_n} \frac{J_r}{J_a}$ – упрощенный индекс Бартона; RQD –

показатель качества породы; J_n, J_r, J_a – параметры, характеризующие число систем трещин, их шероховатость и измененность соответственно; J_w – параметр, характеризующий обводненность пород; SRF – фактор снижения напряжений.

Значение параметра J_w при анализе керна принимают равным 1. Число систем трещин для определения параметра J_n принимают только по результатам анализа структурного описания ориентированного керна.

Для расчета рейтинговых показателей по породным разностям необходимо перейти от описательных характеристик к численным значениям геомеханических параметров трещиноватости породного массива (**рис. 1**).

Параметр JCON76 характеризует состояние трещин по системе Беняевского [2].

Для определения параметра J_a минеральное заполнение трещин в описании керна категоризируют путем выделения групп по степени крепости (**табл. 1**).



Рис. 1. Расчет геомеханических характеристик трещиноватости

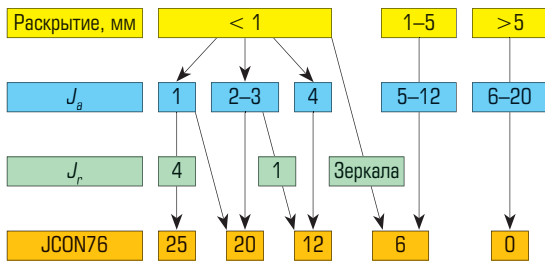


Рис. 2. Взаимосвязь геомеханических характеристик трещиноватости

На основе данных о прочности, крепости и мощности заполнителя трещин значения параметра J_g принимают согласно **табл. 2**.

Величину JCON76 вычисляют по дендрограмме (**рис. 2**), которая связывает между собой значения всех основных геомеханических характеристик трещиноватости породного массива.

Выделение геомеханических доменов

Распределение геомеханических характеристик в пределах каждого литологического домена имеет полимодальный характер. Для выявления закономерности изменения геомеханических свойств породного массива была введена дополнительная доменизация, смысл которой состоит в выделении укрупненных геомеханических интервалов с сохранением концептуальных границ, таких как литологическая разность, количественная и качественная характеристики трещиноватости.

Укрупненные геомеханические интервалы в скважинах выделяли на основе литологических доменов ROCK, кумулятивной интенсивности трещиноватости CFI (количественная характеристика) и значений величины $QRA = J_r/J_g$ (качественная характеристика трещиноватости).

Для анализа интервалов по количественной характеристике трещиноватости выделяли три категории CFI по линейному углу наклона графика (скорости относительного увеличения трещиноватости).

Категория CFI	Угол наклона графика, градус
1	0–50
2	50–75
3	75–90

Таблица 1. Минеральное заполнение трещин

Литология заполнителя		Крепость по шкале Мооса			Группа заполнителя	
Код	Описание	От	До	Среднее	Код	Описание
q	Кварц	7	7	7	1	Крепкий
fsp	Полевой шпат	6	6,5	6,25		
qca	Кварц-карбонат	5	6,5	5,75		
caq	Карбонат-кварц	5	6,5	5,75		
hm	Гематит	5	6	5,5	2	Средний
zeo	Цеолит	3	5	4		
sulf	Сульфиды	3,5	4	3,75		
li	Лимонит	1,5	5,5	3,5		
ang	Ангидрит	3	4	3,5		
ca	Карбонат	3	3	3		
srp	Серпентин	2,5	3,5	3		
chl	Хлорит	2	3,5	2,75		
kl	Каолинит	2	2,5	2,25	3	Слабый
gy	Гипс	2	2	2		
c	Уголь	1	2,5	1,75		
tl	Тальк	1	1	1		
swcl	Глины, склонные к набуханию	1	2	1,50	4	Очень слабый

Таблица 2. Сцепление стенок трещин J_g

Раскрытие, мм	Прочность заполнителя	Крепость заполнителя			
		Крепкий	Средний	Слабый	Очень слабый
<1	Твердый	1	2	3	4
	Мягкий	2	3	4	4
1–5	Твердый	5	5	7	12
	Мягкий	7	7	9	12
>5	Твердый	6	8	10	20
	Мягкий	8	10	13	20

Качественную характеристику трещиноватости QRA категоризировали по интервалам значений следующим образом.

Категория QRA	Значения
1	2–4
2	0,55–2
3	0,05–0,55

Для выделения укрупненных геомеханических интервалов по скважинам применяли многомерный алгоритм кластеризации DBSCAN (Density-based spatial clustering of applications with noise) – плотностной алгоритм пространственной кластеризации с присутствием шума [3, 4].

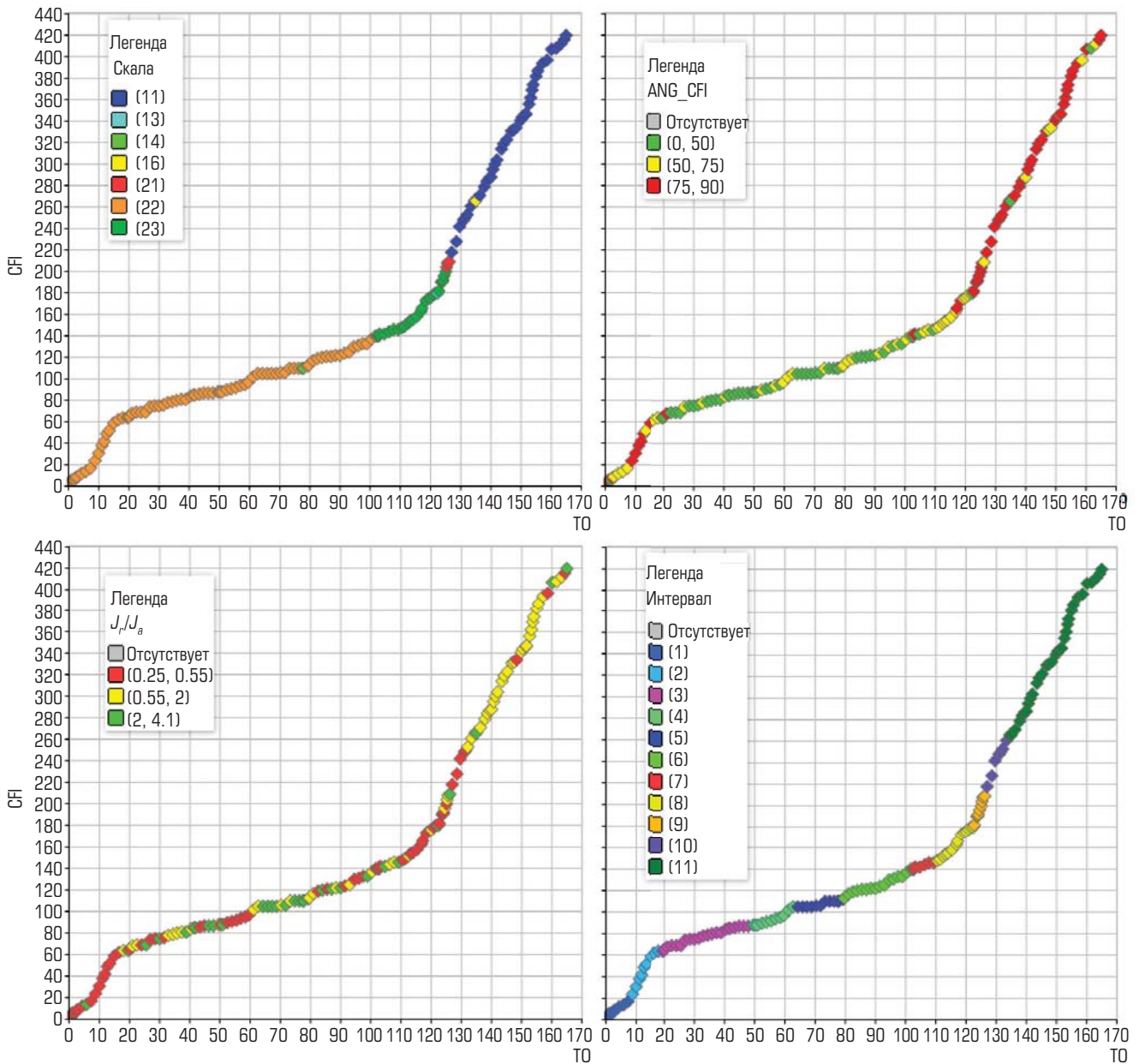


Рис. 3. Анализ укрупненных интервалов по скважинам:

CFI – кумулятивная интенсивность трещиноватости, ед.; TO – концы интервалов описания керна скважин, м

Результат выделения укрупненных интервалов по совместной оценке указанных выше признаков кластеризации на примере одной скважины приведен на **рис. 3**.

В результате совместной кластеризации данных по скважине, содержащей 150 геомеханических интервалов, выделили 11 укрупненных интервалов с выдержанными границами по литологии и свойствам трещиноватости массива.

Далее каждому выделенному крупному интервалу назначили индекс (номер домена) согласно геомеханическому содержанию интервала. Геомеханические домены назначали в интервалах на основе метода взвешенных категорий индекса

Q, учитывающего структурные и прочностные характеристики, а также напряженно-деформированное состояние породного массива.

Категории индекса Q (номера доменов) выбирали согласно классификации породного массива по системе Бартон (индекс Q) [1]. Результаты представлены в **табл. 3**, где также приведены доли категорий рейтинга в общем объеме данных.

Из распределения рейтинга видно, что рабочий интервал значений (0,01; 10) охватывает более 99 % всех данных, включая категории массива от среднего до исключительно слабого.

Таблица 3. Классификация массива пород по индексу Q

Категория рейтинга Q_CAT	Интервал значений Q	Описание горного массива	Доля, %
5	0,01–0,001	Исключительно слабый	3,5
	0,01–0,1	Крайне слабый	
4	0,1–1	Очень слабый	47
3	1–4	Слабый	29
2	4–10	Средний	20
1	10–40	Крепкий	0,5
	40–100	Очень крепкий	
	100–400	Чрезвычайно крепкий	
	400–1000	Исключительно крепкий	

Ввиду незначительного объема 1-й категории рейтинга в исходных данных при выполнении процедуры доменизации значения рейтинга выше 10 рассматривали совместно со 2-й категорией рейтинга.

Разработанный метод доменизации заключается в последовательном присвоении в укрупненных интервалах скважин (композиатах) наиболее значимой категории рейтинга по принципу, отраженному в табл. 4 [5–8].

Метод реализуют пошагово.

1. На первом этапе выбирают композиаты, в которых взвешенно преобладает крайне слабый массив. Если в композиате доля геомеханических интервалов с наихудшей категорией Q_CAT-5 превышает 30 %, то для всего композиата присваивают домен DOMAIN-5. Композиаты с назначенным доменом исключают из дальнейшего рассмотрения.

2. На втором этапе из оставшихся выбирают композиаты, в которых взвешенно преобладают очень слабый и крайне слабый массивы. Если в композиате доля геомеханических интервалов с категориями Q_CAT-4 и 5 превышает 30 %, то для всего композиата присваивают домен DOMAIN-4. Композиаты с назначенным доменом исключают из дальнейшего рассмотрения.

3. На третьем этапе из оставшихся выбирают композиаты, в которых взвешенно преобладают средний и крепкий массивы. Если в композиате доля геомеханических интервалов с категориями Q_CAT-1 и 2 превышает 70 %, а доля интервалов с категориями Q_CAT-4 и 5 не превышает 10 %, то для всего композиата присваивают домен DOMAIN-2.

4. После выполнения этих шагов в оставшихся композиатах доля геомеханических интервалов с категориями Q_CAT-3, 2 и 1 превышает 70 %, а доля интервалов с категориями Q_CAT-4 и 5 не превышает 30 %; для таких композиатов присваивают домен DOMAIN-3.

Таким образом, после выполнения этой процедуры каждому укрупненному интервалу в скважинах (композиату) поставлена соответствующая определенная категория устойчивости массива, являющаяся номером геомеханического домена.

Таблица 4. Значимость категории геомеханического рейтинга, %

Шаг	DOMAIN	Категория рейтинга Q_CAT				
		5	4	3	2	1
1	5	>30				
2	4	>30				
4	3	<30			>70	
3	2	<10				>70

С помощью описанной техники выделения доменов решают сразу две важные задачи геомеханического моделирования:

- укрупненные интервалы позволяют при имплицитном или блочном моделировании [9, 10] выделять в породном массиве крупные сплошные области с выдержанным геомеханическим содержанием, т. е. в пределах этих областей массив масштабно характеризуется соответствующей категорией устойчивости;
- при этом распределение геомеханических характеристик массива в пределах доменов статистически находится в рамках соответствующей категории устойчивости, что одновременно дает и принципиальное понимание специфики домена, и возможность проведения вероятностного и вариографического анализа.

Расчет эквивалентных рейтингов массива

При моделировании поведения породного массива в рамках концепции критерия разрушения Хука – Брауна для определения свойств массива [11–15] в доменах вычисляют взвешенные значения геологического индекса прочности GSI с использованием метода определения эквивалентного значения рейтинга [16–18], представленного на рис. 4.

Для автоматизации процесса обработки данных геомеханического картирования массива построена аппроксимирующая функция F_p двух переменных:

$$F_p(V_p, S_p) = \begin{cases} \frac{V_p S_p}{100} + (100 - V_p)(f_1 V_p + 1)^{-f_2}, & 0 \leq S_p \leq 90 \\ \left(\frac{9V_p}{100} + \frac{100 - V_p}{(0,01V_p + 1)^{0,19}} - 100 \right) \left(10 - \frac{S_p}{10} \right) + 100, & 90 < S_p \leq 100, \end{cases}$$

где

$$f_1 = \begin{cases} 0,03 - 0,001S_p, & 0 \leq S_p \leq 20 \\ 0,01, & 20 < S_p \leq 100 \end{cases}$$

$$f_2 = \begin{cases} 1,41, & 0 \leq S_p \leq 10 \\ 0,94 + 0,047S_p, & 10 < S_p \leq 20 \\ 2,57 - 0,034S_p, & 20 < S_p \leq 40 \\ 2,15 - 0,024S_p, & 40 < S_p \leq 70 \\ 1,45 - 0,014S_p, & 70 < S_p \leq 100 \end{cases}$$

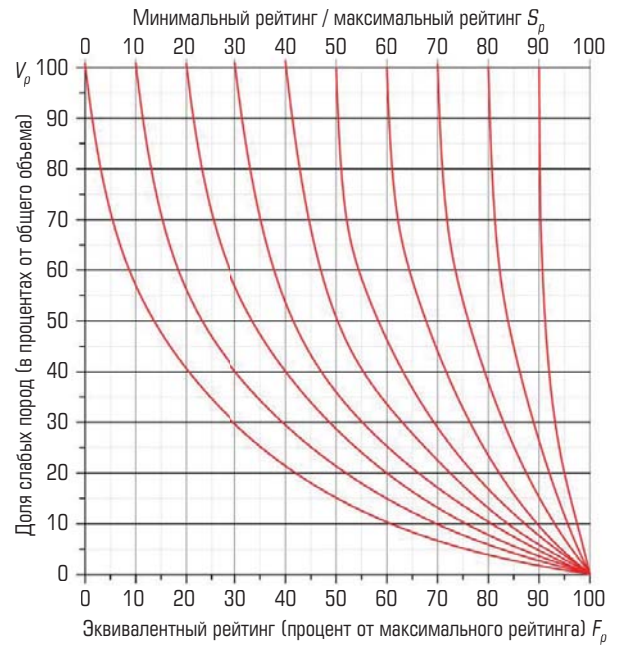
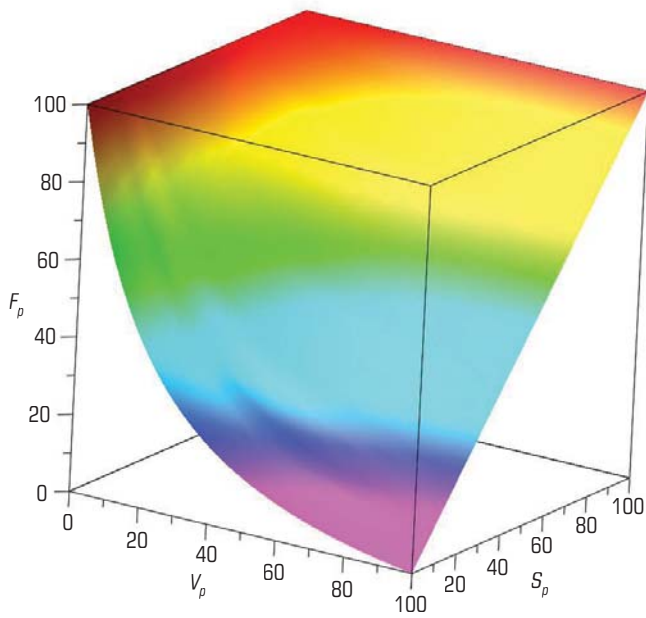


Рис. 4. Вычисление эквивалентного рейтинга

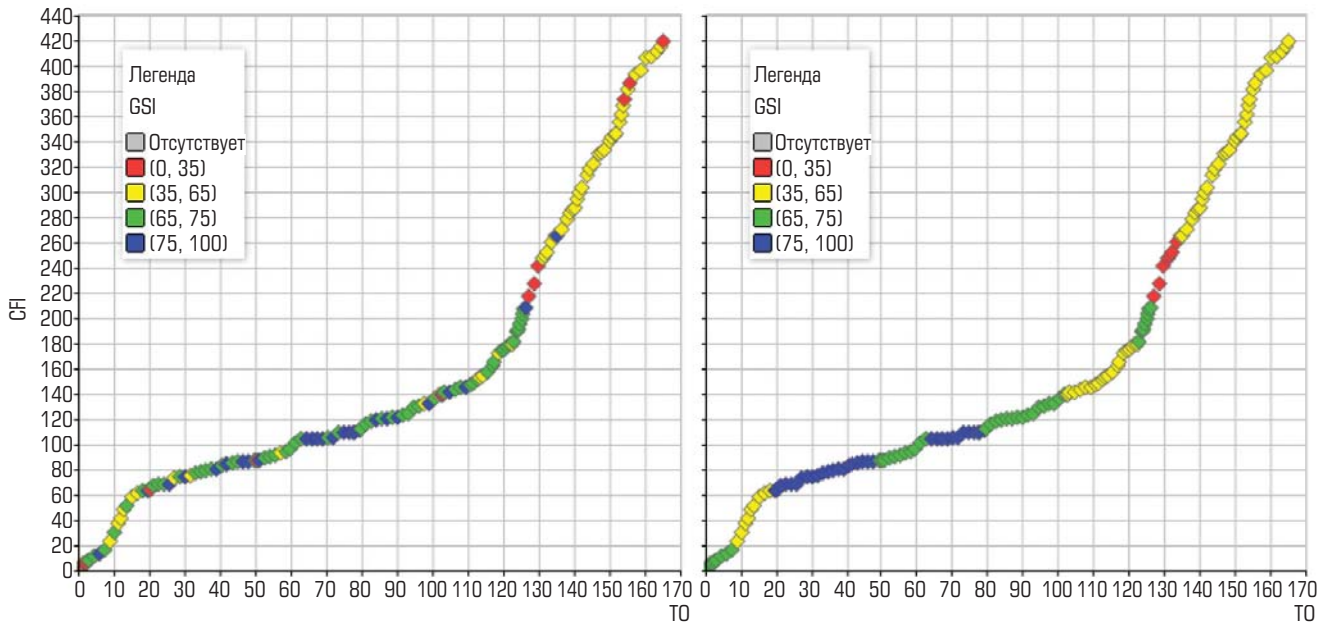


Рис. 5. Эквивалентное значение GSI по доменам: CFI, TO – то же, что и на рис. 3

$S_p = 100 \text{ GSI}_{\text{слабой породы}} / \text{GSI}_{\text{крепкой породы}}$ – отношение максимального и минимального значений GSI в интервале, %;
 $V_p = 100 L_{\text{слабой породы}} / L_{\text{интервала}}$ – доля слабых пород (характеризующихся минимальным значением GSI) в интервале, %.

Определение эквивалентного значения GSI в сравнении с его исходным распределением на примере одной скважины показано на рис. 5.

Предложенный метод дает оценку среднего значения рейтинга $F_e = F_p \text{ GSI}_{\text{крепкой породы}} / 100$ со смещением в сторону минимального значения, т. е. повышает роль слабого массива в формировании характеристики устойчивости всего домена. Для иллюстрации указанного эффекта в домене были рассчитаны также среднее взвешенное значение рейтинга F_w и среднее арифметическое F_a . Сравнение техник оценки среднего

GSI		F_a	S_p
max	min		
75	15	45	20

V_p	F_e	F_w	%
20	45	63	29
25	41	60	32
33	34	55	38
50	25	45	44
67	19	35	46
75	18	30	40
80	17	27	37

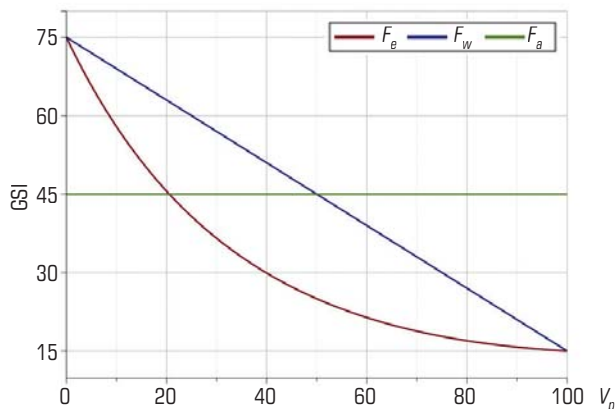


Рис. 6. Сравнение методов оценки

значения рейтинга в зависимости от доли слабых пород в домене приведено на рис. 6.

Как следует из результатов сравнительного анализа, данная методика представляет собой нелинейно взвешенную оценку среднего значения и более тонко учитывает специфику характеристики породного массива.

Например, при соотношении в домене интервалов крепкой (GSI-75) и слабой (GSI-15) породы один к одному ($V_p = 50\%$) средневзвешенное значение F_w совпадает со средним арифметическим F_a и составляет GSI-45, в то время как эквивалентное значение F_e равно GSI-25, что более точно отражает общую характеристику домена. В случае, когда слабая порода занимает треть объема в домене, получаем соотношение оценок $F_e < F_a < F_w$, и очевидно, что характеристика такого домена по методике эквивалентного рейтинга (GSI-34) более справедлива, чем по средневзвешенному значению (GSI-55), превышающему среднее арифметическое значение (GSI-45).

Разница в результатах расчета по этим методикам приведена в виде процентного соотношения $100F_e/F_w$. Как видно, наименьшая расходимость методик (до 30 %) проявляется при малых долях слабого массива в домене, а наибольшая (до 45 %) — когда доля слабых пород в домене составляет от половины до двух третей его объема.

Заключение

Предложенные алгоритм расчета показателя измененности стенок трещин и дендрограмма взаимосоответствия значений геомеханических характеристик трещиноватости рейтинговых систем Бартон и Бенявского позволяют корректно и однозначно интерпретировать данные картирования керна скважин для оценки основных свойств породного массива.


Метод взвешенных категорий для выделения геомеханических доменов позволяет осуществлять композирование интервалов опробования керна в более крупные интервалы, что дает возможность выделять в породном массиве крупные сплошные области с выдержанным геомеханическим содержанием, сохраняя при этом статистическое распределение геомеханических характеристик массива в пределах выделенных доменов для проведения вероятностного и вариографического анализа.

Методика нелинейно взвешенной оценки эквивалентных значений рейтинга позволяет определить его наиболее представительную величину в геомеханическом домене и более достоверно учесть специфику характеристики породного массива по устойчивости.

Библиографический список

- Using the Q-system. Rock Mass classification and support design : Handbook. – Oslo : NGL, 2015. – 54 p.
- Bieniawski Z. T. Engineering Classification of Jointed Rock Masses // Transactions of the South African Institution of Civil Engineers. 1973. Vol. 15. No. 12. P. 335–344.
- Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., Xiaowei Xu. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise // Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – Menlo Park : AAAI Press, 1996. P. 226–231.
- Schubert E., Sander J., Ester M., Kriegel H.-P., Xiaowei Xu. DBSCAN Revisited, Revisited: Why and How You Should (Still) Use DBSCAN // ACM Transactions on Database Systems. 2017. Vol. 42. No. 3. DOI: 10.1145/3068335
- Hoek E., Carter T. G., Diederichs M. S. Quantification of the Geological Strength Index Chart // 47th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. – San Francisco, 2013.
- Hutchinson D. J., Diederichs M. S. Cablebolting in Underground Mines. – Vancouver : BiTech Publishers Ltd., 1996. – 416 p.
- Hoek E., Brown E. T. Empirical Strength Criterion for Rock Masses // Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1990. Vol. 106. P. 1013–1035.
- Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition // Mining and Tunnelling Innovation and Opportunity : Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and the 17th Tunnelling Association of Canada Conference. – Toronto : University of Toronto, 2002. Vol. 1. P. 267–273.
- Бирючев И. В., Макаров А. Б., Усов А. А. Геомеханическая модель рудника. Часть 1. Создание // Горный журнал. 2020. № 1. С. 42–48.
- Бирючев И. В., Макаров А. Б., Усов А. А. Геомеханическая модель рудника. Часть 2. Использование // Горный журнал. 2020. № 2. С. 35–44.
- Hoek E., Brown E. T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. No. 3. P. 445–463.

12. Jianping Zuo, Jiayi Shen. The Hoek–Brown Failure criterion – From theory to application. – Singapore : Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020. – 225 p.
13. Hossein Rafiei Renani, Ming Cai. Forty-Year Review of the Hoek–Brown Failure Criterion for Jointed Rock Masses // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022. Vol. 55. Iss. 1. P. 439–461.
14. Марысюк В. П., Сабянин Г. В., Андреев А. А., Васильев Д. А. Оценка напряженного состояния рудного массива при ведении очистных работ на глубоких рудниках Талнаха // *Горный журнал*. 2020. № 6. С. 17–22. DOI: 10.17580/gzh.2020.06.02
15. Господариков А. П., Трофимов А. В., Киркин А. П. Оценка деформационных характеристик хрупких горных пород за пределом прочности в режиме

- одноосного сервогидравлического нагружения // *Записки Горного института*. 2022. Т. 256. С. 539–548.
16. Молдован Д. В., Чернобай В. И., Соколов С. Т., Баженова А. В. Конструктивные решения запирающие продуктов взрыва во взрывной полости // *ГИАБ*. 2022. № 6-2. С. 5–17.
17. Laubscher D. H. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 1990. Vol. 90. No. 10. P. 257–273.
18. Read J., Stacey P. Guidelines for open pit slope design. – Collingwood : CSIRO Publishing, 2009. – 487 p. 

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 6, pp. 12–18
DOI: 10.17580/gzh.2023.06.02

Initial data analysis in geomechanical modeling of Skalisty–Gluboky Mine within the limits of high-grade ore body S-6 of Oktyabrsky deposit

Information about authors

N. O. Soluyanov¹, Chief Geomechanic, soluyanovno@normik.ru

A. A. Tsymbalov², Deputy Director of Mining Practice

S. V. Kuzmin³, Research Manager in Geomechanics, Mine Planning Directorate, Candidate of Engineering Sciences

A. A. Davydov⁴, Head of Skalisty Mine Integrated Design and Development Office

¹NorNickel Technical Services LLC, Saint-Petersburg, Russia

²NorNickel's Polar Division, Norilsk, Russia

³Siberian Coal Energy Company, Moscow, Russia

⁴NN Development LLC, Moscow, Russia

Abstract

A geomechanical model of a mineral deposit is a block model including the data on lithology, strength properties and geomechanical characteristics of rock mass. The source information of modeling is the rock mass structure and lithology characteristics, the core description and lab-scale testing of rock samples. At the stage of the source data analysis, it is important to interpret the input data correctly toward the proper rock mass quality rating, to delineate geomechanical domains within a mine field and to determine the weighted values of rock mass properties within the limits of the domains.

The proposed joint alteration number algorithm and dendrogram of correlation between the Barton and Bieniawski systems of rock mass classification allow the correct and unambiguous interpretation of the core analysis data for the assessment of the basic properties of rock mass.

The method of the weighted categories in delineation of geomechanical domains enables composing core sampling intervals into larger intervals, which makes it possible to delineate large and solid and geomechanically consistent areas in rock mass while preserving the statistical distribution of geomechanical characteristics within the limits of the delineated domains for the purposes of the probabilistic and variographic analysis.

The nonlinear weighted evaluation procedure for the equivalent values of a rating allows finding the most representative value in a geomechanical domain and provides a reliable specifics of the stability characteristic of rock mass.

The authors wish to appreciate participation of the members of the Center for Geodynamic Safety, NorNickel's Polar Division in these studies, namely, V. P. Marusyuk, Director, M. P. Sergunin, Head of a department, and Leading Specialists A. A. Bazin and A. K. Ustinov.

Keywords: geomechanical model, rock mass quality ratings, geomechanical domain, geomechanical assessment procedure, rock mass jointing, Hoek–Brown criterion.

References

1. Using the Q-system. Rock Mass classification and support design : Handbook. Oslo : NGI, 2015. 54 p.

2. Bieniawski Z. T. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. *Transactions of the South African Institution of Civil Engineers*. 1973. Vol. 15, No. 12. pp. 335–344.
3. Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., Xiaowei Xu. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Menlo Park : AAAI Press, 1996. pp. 226–231.
4. Schubert E., Sander J., Ester M., Kriegel H.-P., Xiaowei Xu. DBSCAN Revisited, Revisited: Why and How You Should (Still) Use DBSCAN. *ACM Transactions on Database Systems*. 2017. Vol. 42, No. 3. DOI: 10.1145/3068335
5. Hoek E., Carter T. G., Diederichs M. S. Quantification of the Geological Strength Index Chart. 47th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. San Francisco, 2013.
6. Hutchinson D. J., Diederichs M. S. Cablebolting in Underground Mines. Vancouver : BiTech Publishers Ltd., 1996. 416 p.
7. Hoek E., Brown E. T. Empirical Strength Criterion for Rock Masses. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1990. Vol. 106. pp. 1013–1035.
8. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. Hoek–Brown failure criterion—2002 Edition. *Mining and Tunnelling Innovation and Opportunity : Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and the 17th Tunnelling Association of Canada Conference*. Toronto : University of Toronto, 2002. Vol. 1. pp. 267–273.
9. Biryuchev I. V., Makarov A. B., Usov A. A. Geomechanical model of underground mine. Part I. Creation. *Gornyi Zhurnal*. 2020. No. 1. pp. 42–48. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.08
10. Biryuchev I. V., Makarov A. B., Usov A. A. Geomechanical model of underground mine. Part II. Application. *Gornyi Zhurnal*. 2020. No. 2. pp. 35–44. DOI: 10.17580/gzh.2020.02.04
11. Hoek E., Brown E. T. The Hoek–Brown failure criterion and GSI—2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019. Vol. 11, No. 3. pp. 445–463.
12. Jianping Zuo, Jiayi Shen. The Hoek–Brown Failure criterion – From theory to application. Singapore : Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020. 225 p.
13. Hossein Rafiei Renani, Ming Cai. Forty-Year Review of the Hoek–Brown Failure Criterion for Jointed Rock Masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022. Vol. 55, Iss. 1. pp. 439–461.
14. Marysyuk V. P., Sabyanin G. V., Andreev A. A., Vasiliev D. A. Stress assessment in deep-level stoping in Talnakh mines. *Gornyi Zhurnal*. 2020. No. 6. pp. 17–22. DOI: 10.17580/gzh.2020.06.02
15. Gospodarikov A. P., Trofimov A. V., Kirkin A. P. Evaluation of deformation characteristics of brittle rocks beyond the limit of strength in the mode of uniaxial servohydraulic loading. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 256. pp. 539–548. DOI: 10.31897/PMI.2022.87
16. Moldovan D. V., Chernobay V. I., Sokolov S. T., Bazhenova A. V. Design concepts for explosion products locking in chamber. *GIAB*. 2022. No. 6-2. pp. 5–17.
17. Laubscher D. H. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 1990. Vol. 90, No. 10. pp. 257–273.
18. Read J., Stacey P. Guidelines for open pit slope design. Collingwood : CSIRO Publishing, 2009. 487 p.