



ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Научная статья

УДК 550.8.05:550.853:550.856

EDN: VOUMMB

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-3-289-301



Прогноз устойчивости подземных горных выработок Ирокиндинского месторождения на основе сопоставления методик прогнозной оценки состояния массива горных пород

И.В. Матвеева^{a✉}, Т.О. Шигарова^b, О.А. Матвеев^c

^{a-c}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Цель данного исследования заключалась в сопоставлении и корректировке результатов прогноза устойчивости подземных горных выработок Ирокиндинского золоторудного месторождения по различным методикам оценки состояния массива горных пород на основе анализа: только структурных параметров, многопараметрической классификации структурных параметров и инженерно-геологических показателей по З.Т. Бениавски и распределения массовой трещиноватости. Для оценки инженерно-геологических условий глубоких горизонтов месторождения использовались данные, полученные в процессе геомеханической документации керна при проходке разведочных и гидрогеологических скважин и документации стенок подземных горных выработок. Это позволило оценить степень раздробленности пород массива, влияющую на устойчивость подземных горных выработок. По отобранным пробам пород из керна разведочных скважин и горных выработок выполнен полный комплекс определений физико-механических и деформационных свойств. Всего в течение полевого сезона отобрано и проанализировано 184 пробы и выделено 10 разновидностей пород, характеризующихся различной прочностью, и, как следствие, степенью устойчивости. Проведенный сравнительный анализ на примере Ирокиндинского месторождения позволяет говорить о необходимости комплексного применения этих методик с целью повышения достоверности результатов и максимально корректного определения класса устойчивости горного массива для проходки в нем горной выработки. Результаты, полученные по различным методикам, должны рассматриваться как набор сигналов для принятия проектных решений об укреплении горных выработок.

Ключевые слова: классификации, массив горных пород, геомеханическая документация, классы устойчивости, инженерно-геологические показатели, трещиноватость, структурные параметры

Для цитирования: Матвеева И.В., Шигарова Т.О., Матвеев О.А. Прогноз устойчивости подземных горных выработок Ирокиндинского месторождения на основе сопоставления методик прогнозной оценки состояния массива горных пород // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 3. С. 289–301. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-289-301>. EDN: VOUMMB.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

Original article

Forecasting stability of Irokinda deposit underground mine workings based on comparison of rock mass state prediction estimate methods

Irina V. Matveeva^{a✉}, Tatiana O. Shigarova^b, Oleg A. Matveev^c

^{a-c}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the study is to compare and adjust the results of stability forecast for Irokinda gold deposit underground mine workings using various estimation methods of rock mass state based on the analysis of structural parameters only, multiparameter classification of structural parameters and engineering-geological indicators according to Z. Bieniawski as well as mass fracturing distribution. Engineering and geological conditions of deposit deep horizons have been estimated using the data obtained under geomechanical description of the core when drilling exploratory and hydrogeological boreholes and description of the walls of underground mine workings. All these made it possible



to estimate the rock mass fragmentation degree, which affects the stability of underground mine workings. A full range of physical, mechanical and deformation property definition was performed using rock samples taken from the core of exploratory boreholes and mine workings. A total of 184 samples have been taken and analyzed during the field season with distinguishing of 10 rock varieties characterized by different strength and stability degree. The comparative analysis conducted on the example of the Irokinda field implies the need of the integrated use of these methods, which will enable increasing of result reliability and most accurate determination of the stability class of the rock mass for its further mining. The results obtained by various methods should be considered as a set of signals for making design decisions on strengthening mine workings.

Keywords: classifications, rock mass, geomechanical documentation, stability classes, engineering and geological parameters, fracturing, structural parameters

For citation: Matveeva I.V., Shigarova T.O., Matveev O.A. Forecasting stability of Irokinda deposit underground mine workings based on comparison of rock mass state prediction estimate methods. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(3):289-301. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-289-301>. EDN: VOUMMB.

Введение

Основную часть площади Ирокиндинского месторождения занимает киндиканская толща архейского возраста, которая представлена парагнейсами, параамфиболитами, кристаллосланцами, кальцифирами и мраморами. Контакты с окружающими образованиями часто тектонические. Вся толща разбита тектоническими нарушениями в виде разрывов различной морфологии и кинематики, зон дробления, расщепления, будинажа и милонитизации с гидротермально-метасоматическими изменениями и бластезом, что существенно влияет на устойчивость подземных горных выработок.

Цель предполагаемого исследования заключалась в сопоставлении методик оценки состояния массива горных пород для корректировки прогноза устойчивости подземных горных выработок Ирокиндинского золоторудного месторождения.

К задачам исследования можно отнести:

- оценку состояния массива горных пород подземных горных выработок по различным методикам;
- построение цифровой модели состояния массива подземных горных выработок с выделением классов устойчивости;
- анализ факторов пространственного изменения устойчивости массива горных пород;
- сопоставление и корректировку классов устойчивости массива горных пород по различным методикам.

Одновременное применение методик для участков со сложными структурно-геологиче-

скими условиями позволит скорректировать общие выводы прогноза устойчивости как в худшую, так и в лучшую сторону [1, 2]¹⁻⁵. При учете гидрогеологических условий, прочностных характеристик и структурных параметров, входящих в методику многопараметрической классификации З.Т. Бенявски, а также состояния массива горных пород на основе анализа массовой трещиноватости, достоверность прогноза инженерно-геологических условий эксплуатации нижних горизонтов месторождений повышается.

Для обработки полученных данных и построения моделей и разрезов использовалось программное обеспечение AutoCAD и CorelDraw.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись стенки подземных горных выработок НТС-1 с пикета 0-121 и НТС-2 с пикета 0-70 участка Тулуинский и керн 11 скважин, пробуренных из буровой камеры БК-2 с горизонта 940, в которых проведена структурная документация и опробование пород для определения их физико-механических и деформационных свойств.

Эмпирико-аналитический подход к оценке устойчивости по применяемым нами методикам позволяет подробно охарактеризовать состояние горного массива около существующих горных выработок, а также спрогнозировать возможные изменения в будущем [3].

¹ Кузькин В.И., Ярм Л.А., Кочетков М.В. Методическое руководство по изучению инженерно-геологических условий рудных месторождений при их разведке. М.: Изд-во ВИМС, 2001. 153 с.

² Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород: учебник для вузов. М.: Недра, 1967. 288 с.

³ Булычев Н.С. Механика подземных сооружений: учебник для вузов. М.: Недра, 1982. 270 с.

⁴ Bieniawski Z.T. Engineering rock mass classifications. New York: John Wiley and Sons, 1989. 251 p.

⁵ Кочетков М.В., Кузькин В.И., Ярм Л.А. Методическое руководство по изучению инженерно-геологических условий рудных месторождений при их разведке. М.: Изд-во ВИМС, 2001. 153 с.



Для оценки состояния подземных горных выработок на Ирокиндинском месторождении нами применялись следующие методики^{4,5}:

- методика оценки состояния массива пород на основе анализа структурных параметров (далее «Методика на основе анализа структурных параметров»);

- методика многопараметрической классификации инженерно-геологических показателей, используемых при прогнозной оценке устойчивости выработок по З.Т. Бенявски (далее «Методика многопараметрической классификации З.Т. Бенявски»);

- методика оценки состояния массива горных пород на основе анализа распределения массовой трещиноватости (далее «Методика на основе анализа распределения массовой трещиноватости»).

Для достоверного прогноза состояния горного массива при отработке глубоких горизонтов месторождений необходимо предусматривать совместное применение вышеуказанных методик.

Первая методика детально описана в статье [3] и позволяет оценить устойчивость существующих горных выработок на основе таких структурных параметров, как модуль трещиноватости, коэффициент качественного керна (RQD) и среднее расстояние между трещинами⁶ [5–8]. По результатам авторами выделены классы устойчивости от благоприятных (класс А) до весьма неблагоприятных (класс В) для проходки горной выработки. Блоки горного массива авторами отнесены преимущественно к благоприятным для прохождения в нем горной выработки и неблагоприятным, реже к весьма неблагоприятным.

В основе Методики многопараметрической классификации З.Т. Бенявски лежит оценка факторов, характеризующих состояние массивов горных пород, используемых в методике, описанной выше, а также наличие подземных вод и прочностные характеристики^{1,5} [9, 10].

Суть оценки заключается в следующем: определенному участку массива горных пород приписывается определенная величина (класс), которая получается в результате оценки основных инженерно-геологических параметров [11, 12]. Для анализа состояния горного массива были проанализированы такие частные параметры, как модуль трещино-

ватости, коэффициент качества керна (RQD), среднее расстояние между трещинами, входящие в Методику оценки состояния массива пород на основе анализа структурных параметров⁴, а также прочность на одноосное сжатие, характеристика особенности трещин, ориентация по отношению к оси выработки и гидрогеологические условия¹.

Для того, чтобы прогнозировать состояние массива горных пород, методы его разработки и тип крепления, ему присваивается определенный класс, который определяется по величине суммарной балльности, вводится показатель – класс скального массива (в нашем случае – класс блока), являющийся количественной величиной оценки массивов того или иного класса. Конечным результатом работы является разбитие всего горного массива на блоки, имеющие четкие параметры и определенный прогноз устойчивости.

Анализ состояния массива горных пород на основе Методики распределения массовой трещиноватости базируется на выделении групп трещин различной степени предрасположенности к обрушению [13–15]. На полевом этапе создаются таблицы с массовыми замерами трещин по однородным интервалам и общей характеристикой с первичным распределением по системам трещин. Далее происходит выделение групп по двум критериям: углу падения и азимуту простирания трещин. После распределения всех трещин в интервале по двум типам групп составляется итоговая таблица массовой трещиноватости и дается общая характеристика интервала. Результатом применения данной методики является выделение опасных интервалов на фоне всего горного массива.

Результаты исследований и их обсуждение

Результатом исследований стал анализ и сопоставление полученных данных. В качестве примера сопоставления методик рассматривается скважина С-11/940. В табл. 1 представлены характеристики массива горных пород, входящие в состав оцениваемых показателей по вышеуказанным трем методикам.

Основными объектами для анализа по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски выбраны блоки, размер которых варьируется от 1 до 10 м, выделенные

⁶ Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. Л.: Недра, 1990. 328 с.



Таблица 1. Характеристики массива горных пород по скважине C-11/940
Table 1. Rock mass properties for C-11/940 well

Характеристики массивов горных пород																										
Интервал, м		Абс. отм., м		Методика на основе анализа структурных параметров			Методика многопараметрической классификации З.Т. Белявски												Методика на основе анализа распределения массовой трещиноватости			Качественные характеристики классы устойчивости массива горных пород				
				Модуль трещиноватости	RQD, %	Среднее расстояние между трещинами, см	Класс	Прочность на одноосное сжатие	Показатель качества керна		Расстояние между трещинами		Характеристика особенностей трещин		Гидрогеологические условия		Ориентация трещин по отношению к оси выработки		Сумма баллов	Класс	Угол падения относительно нормали к плоскости трещины, град.				Угол между азимутами трещин, град.	Класс
									количество трещин	RQD, %	баллы	см	баллы	характеристика	баллы	условия	условия	баллы								
0–38	935,98–898,73	3,1	91	50,2	A	106,1	12	97	91	20	50,2	7	В-ш/п-ш	20	Сухо	15	Благопр.	-2	72	III, II	0–29	60–120	Ia	Средняя, хорошая скала, благоприятный, устойчивый		
38–46	898,73–890,89	4,8	86	25	B	99,63	7	38	86	17	25	10	П-ш, <5	10	Вода	7	Дов. хорош.	-5	46	II, IV, III	30–59	121–150	IIб	Хорошая, средняя скала, неблагоприятный, слабоустойчивый		
46–84	890,89–853,63	2,2	93	40,5	A	97,28	7	84	93	20	40,5	10	В-ш/п-ш	20	Вода	7	Дов. хорош.	-5	59	III	30–59	60–120	IIa	Средняя скала, благоприятный, слабоустойчивый		
84–102	853,63–835,99	2,4	98	40,8	B	174	12	44	98	20	40,8	10	В-ш/п-ш	20	Вода	7	Дов. хорош.	-5	64	III	30–59	121–150	IIб	Средняя скала, неблагоприятный, слабоустойчивый		
102–109,6	835,99–828,64	16,3	51	9,5	B	47,16	4	130	51	13	9,5	8	П-ш, >5	0	Вода	7	Неблагопр.	-10	22	IV	60–90	60–120	IIIa	Плохая скала, благоприятный, неустойчивый		
109,6–121,6	828,64–806,03	5,2	83	18,3	B	173,8	12	62	83	17	18,3	8	П-ш, <5	10	Вода	7	Благопр.	-2	52	III, II	30–59	60–120	IIa	Средняя, хорошая скала, благоприятный, слабоустойчивый		
121,6–205,6	806,03–734,43	2,1	97	46,4	A	110,8	12	176	97	20	46,4	10	П-ш/в-ш	20	Вода	7	Благопр.	-2	67	II, III	0–29	60–120	Ia	Хорошая, средняя скала, благоприятный, устойчивый		
205,6–208,6	734,43–731,49	4,7	92	22,5	B	49,67	4	14	92	20	22,5	10	П-ш	10	Вода	7	Неблагопр.	-10	41	III, IV	60–90	121–150	IIIб	Средняя плохая скала, неблагоприятный, неустойчивый		
208,6–268,6	731,49–672,67	2,6	94	26,5	A	75,34	7	154	94	20	26,5	10	В-ш/п-ш, <5	10	Вода	7	Дов. хорош.	-5	49	III	30–59	60–120	IIa	Средняя скала, благоприятный, слабоустойчивый		

Примечание. В-ш – волнисто-шероховатая поверхность стенок трещин; п-ш – плоская шероховатая поверхность стенок трещин; благопр. – благоприятная; неблагопр. – неблагоприятная; дов. хорош. – довольно хорошая; <5 – раскрытие трещин 1–5 мм; >5 – раскрытие трещин более 5 мм.



на этапе документации керна скважин, и взаимодействие между ними. Точность полученных данных оценивается в зависимости от частоты проведенного опробования выработки и влияния локальных тектонических элементов на весь массив пород в целом.

Анализ структурных параметров (модуль трещиноватости, RQD и среднее расстояние между трещинами) позволили выявить закономерности в тектоническом состоянии массива (рис. 1, табл. 2) и выполнить их привязку к обобщенной оценке, согласно системе З.Т. Бенявски (табл. 3).

С целью повышения достоверности результатов, полученных по Методике на основе анализа структурных параметров, разработана корреляционная таблица сравнения с классами устойчивости массива горных пород, определенных по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски (табл. 4).

Так, по Методике на основе анализа только структурных параметров, горный массив, определенный как благоприятный для проходки горных выработок, при расширении оцениваемых инженерно-геологических показателей по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски, подразделяется на очень хорошую, хорошую и среднюю скалу [16–18].

По результатам выполненных работ составлены разрезы по буровым линиям скважин, на которые нанесены полученные данные по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски, и выполнена оценка устойчивости массива прилегающих горных пород, а также присвоен класс скального массива по устойчивости от II до V и дана качественная характеристика состояния массива.

Итогом стало выявление следующих особенностей горного массива. В районе скважин, пройденных из буровой камеры БК-2 горизонта

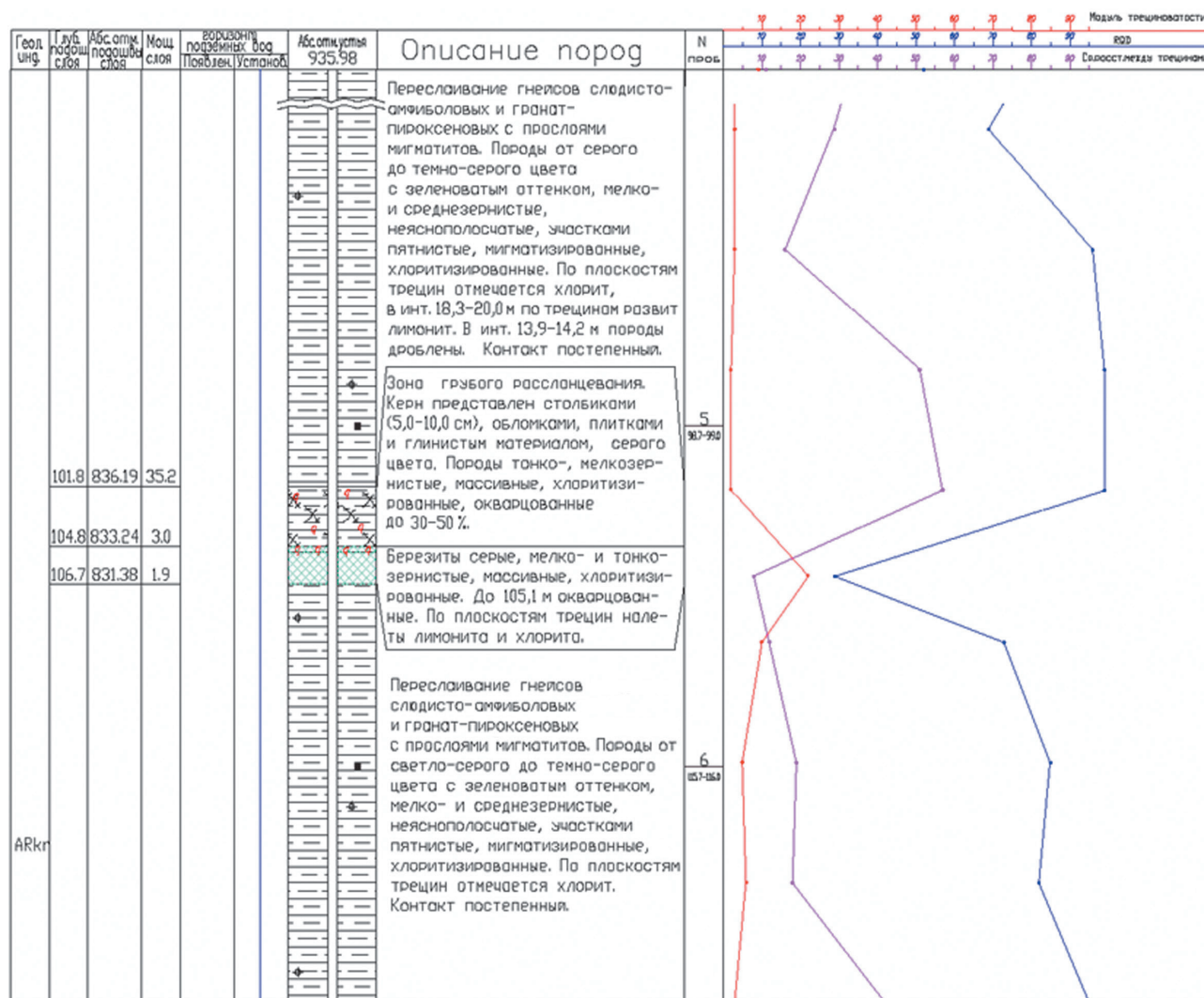


Рис. 1. Фрагмент геологической колонки по скважине C-11/940
Fig. 1. A fragment of the geological column for C-11/940 well



Таблица 2. Закономерности тектонического состояния горного массива

Table 2. Regularities of rock mass tectonic state

Признаки	Описание	Характеристика устойчивости массива пород	Рекомендации по проходке горной выработки
Благоприятные	Резкое увеличение коэффициента RQD и среднего расстояния между трещинами на фоне резкого падения модуля трещиноватости в блоке	Цельный массив, слабо подверженный тектоническим воздействиям. Массивы ограничены крупными тектоническими структурами, негативно влияющими на их устойчивость	Устойчивая горная выработка
	Плавное изменение всех трех параметров при условии, что коэффициент RQD неизменно выше модуля трещиноватости	Спокойный массив горных пород, ненарушенный крупными тектоническими структурами. Чем выше разница между значением RQD и модулем трещиноватости, тем устойчивее будет этот блок	Наличие таких блоков, тянущихся на десятки метров, является важным критерием выбора расположения горных выработок
Неблагоприятные	Резкое увеличение модуля трещиноватости на фоне резкого падения коэффициента RQD и среднего расстояния между трещинами в блоке	Нахождение в пределах массива тектонических нарушений различного генезиса: крупных разломов зон интенсивного расщепления и дробления, замковых частей складок и т. п.	Участки требуют тщательного изучения на предмет определения причин нарушения сплошности массива, прежде, чем планировать в них горные выработки
	Прерывание показателей (значение 0 или нет данных) говорит о полном разрушении скального массива до состояния щебня, дресвы	Крайне неустойчивое состояние массива	
	Плавное изменение всех трех параметров при условии, что модуль трещиноватости неизменно выше коэффициента RQD на значительное значение (не менее 20 условных единиц по шкале модуля трещиноватости)	Неблагоприятные тектонические условия в массиве, обусловленные четко проявленной сланцеватостью, наличием нескольких постоянных систем трещин и других нарушений сплошности пород, проявляемых по всему массиву	

Таблица 3. Сопоставление классов устойчивости горного массива

Table 3. Comparison of rock mass stability classes

Номер класса	Описание основных параметров класса устойчивости по Методике на основе анализа структурных параметров	Соответствие классам по Методике многопараметрической классификации З.Т. Беньявски
А	Блок горного массива благоприятный для прохождения в нем горной выработки. Имеет высокие значения RQD и низкие значения модуля трещиноватости	Соответствует I, II, III классу. Может соответствовать IV классу в случае неизменности структурных показателей относительно соседних блоков. Соответствует второму описанному выше благоприятному признаку
Б	Блок горного массива неблагоприятный для прохождения в нем горной выработки. Имеет высокие значения RQD и низкие значения модуля трещиноватости, но малые мощности (меньше 20 м), что не позволяет спроектировать выработку с устойчивой кровлей	Соответствует II, III и IV классу. Соответствует первому описанному выше благоприятному признаку
В	Блок горного массива весьма неблагоприятный для прохождения в нем горной выработки. Имеет высокие значения модуля трещиноватости и низкие значения модуля RQD, что не позволяет спроектировать выработку с устойчивой кровлей	Соответствует IV и V классу. Соответствует какому-либо из описанных трех неблагоприятных признаков



Таблица 4. Корреляционная таблица классов устойчивости массива горных пород

Table 4. Rock mass stability class correlation table

Класс устойчивости по Методике на основе анализа структурных параметров		Условный цвет	Класс устойчивости по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски	
Благоприятный	А		I	Очень хорошая скала
			II	Хорошая скала
			III	Средняя скала
Неблагоприятный	Б		IV	Плохая скала
Весьма неблагоприятный	В		V	Очень плохая скала

940, выделено несколько наиболее неблагоприятных горизонтов, в пределах которых резко повышается вероятность ухудшения устойчивости горного массива. К наиболее неустойчивым можно отнести горизонты: 840-820; 800-760 и 710-670. Несмотря на общий неблагоприятный фон на отмеченных выше горизонтах на одних глубинах могут встречаться

как классы устойчивости II (хорошая скала), так и V (очень плохая скала), что говорит о высокой степени влияния тектонических структур (рис. 2).

Состояние горного массива можно назвать линейно изменчивым. Большинство отмеченных зон низкой устойчивости имеют четкий линейный характер, что связано с их тектони-

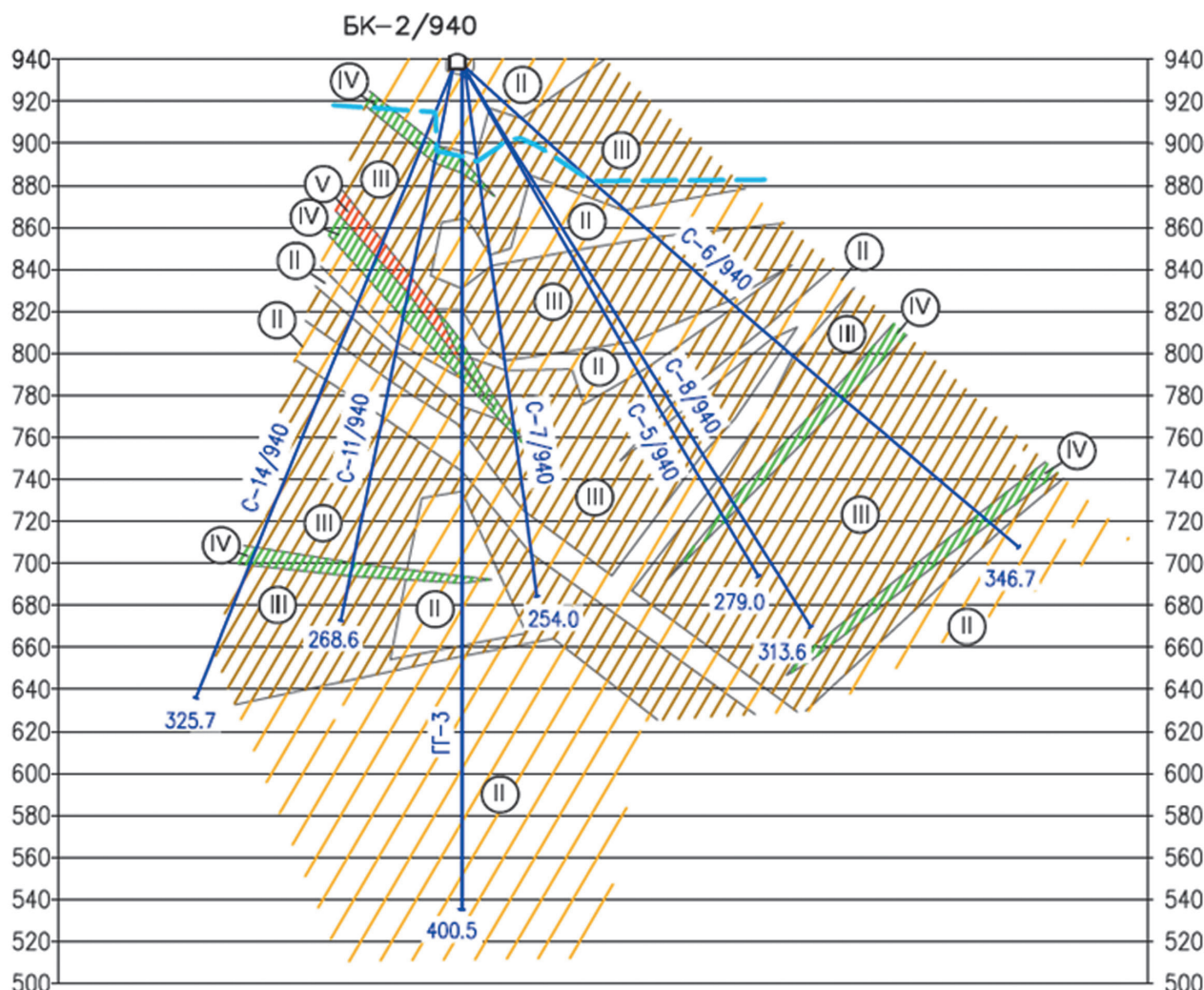


Рис. 2. Геологический разрез по буровой линии с нанесенными классами устойчивости горного массива по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски

Fig. 2. Geological section along the drilling line with the plotted rock mass stability classes according to Z. Bieniawski method of multiparameter classification



ческим происхождением. Можно отметить две главные тектонические системы с направлением падения на северо-восток и юго-запад. Углы падения этих систем – 50–75°, слабоустойчивые и неустойчивые.

Большой вклад в низкую устойчивость горного массива вдоль линейных ослабленных зон вносит их обводненность. Абсолютные отметки уровня подземных вод сильно отли-

чаются в скважинах (на десятки метров), что говорит о преимущественно трещинно-жильном характере вод.

Корреляционная сопоставимость классов устойчивости массива горных пород скважины С-11/940 по Методике на основе анализа структурных параметров и Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски показана на рис. 3.

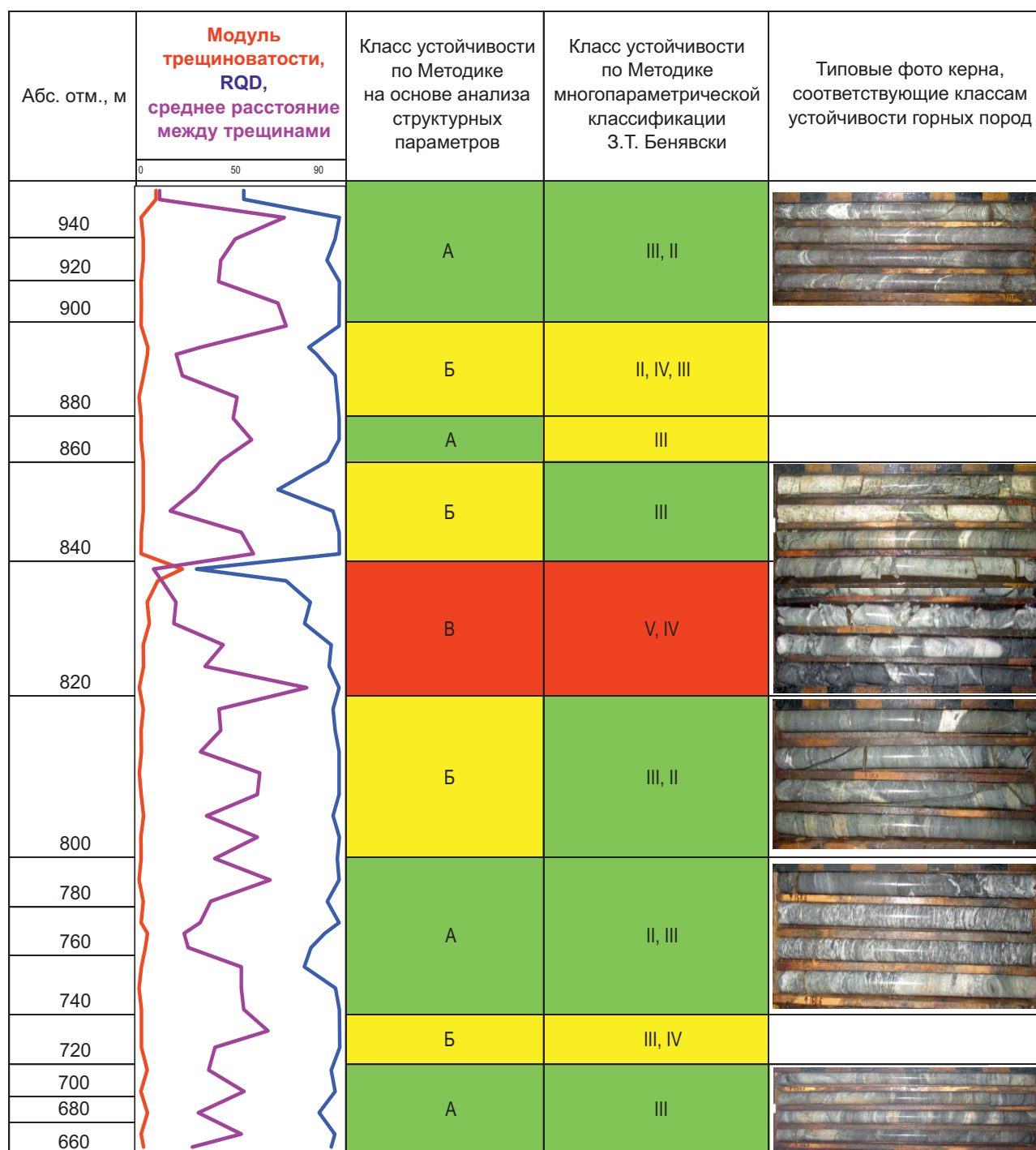


Рис. 3. Результаты корреляционной сопоставимости классов устойчивости массива горных пород по скважине С-11/940
Fig. 3. Results of correlation comparability of rock mass stability classes for C-11/940 well



Полученный результат позволяет наглядно сопоставить результаты по двум методикам. Так, блоки пород с благоприятными условиями (класс А) соответствуют II и III классам, определенным по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски. Блоки с неблагоприятными условиями (класс Б), согласно полученным показателям физико-механических свойств, включенных в Методику многопараметрической классификации З.Т. Бенявски, отнесены к II и III классам (хорошая и средняя скала). Таким образом, при учете прочностных характеристик, полученных в результате лабораторных исследований, класс устойчивости массива повышен. В интервале 840–820 м скважиной С-11/940 вскрыта зона дробления, массив горных пород в пределах которой, согласно обоим методикам, относится к весьма неблагоприятным (классы В и IV–V). Для этого интервала характерно увеличение значения модуля трещиноватости и понижение значений модуля RQD и среднего расстояния между трещинами вплоть до пересечения между собой графиков показателей, что не позволяет спроектировать выработку с устойчивой кровлей.

Особое внимание стоит обратить на горизонты, где показатели двух методик расходятся. Такая ситуация обусловлена двумя причинами:

1. Структурные показатели говорят о монолитном слабо трещиноватом массиве, а Методика многопараметрической классификации З.Т. Бенявски дает плохой прогноз, учитывая низкие физико-механические характеристики пород, общую выветрелость массива или наличие осложнений в виде воды, мягкого заполнителя трещин и др.

2. Обратная ситуация, когда низкие структурные показатели, полученные по Методи-

ке многопараметрической классификации З.Т. Бенявски, нивелируются высокими значениями прочности пород и другими характеристиками, что в конечном итоге дает благоприятную оценку массива.

Обе описанные ситуации рекомендуется рассматривать по самой отрицательной оценке и присваивать массиву горных пород более низкий класс устойчивости.

Также для корректировки классов, выделенных по вышеописанным двум методикам, могут быть использованы классы устойчивости, выделенные согласно Методике оценки состояния массива горных пород на основе анализа распределения массовой трещиноватости.

После распределения всех трещин в интервале по двум типам групп: углу падения относительно угла наклона ствола выработки и углу между азимутами простирания выработки и системы трещин, составляется итоговая таблица распределения массовой трещиноватости и дается общая характеристика интервала (табл. 5).

Для классификации устойчивости массива пород по данной методике в каждую клетку записывается значение количества трещин, попавших в общую группу (по углу падения и азимуту простирания). Основанием для отнесения отдельного интервала к какому-либо классу устойчивости служит преодоление 50 % порога в распределении массовых замеров трещин.

Использование данной методики показывает хорошие результаты при уточнении классов устойчивости горных пород, полученных по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски.

Применение Методики многопараметрической классификации З.Т. Бенявски в су-

Таблица 5. Классификация устойчивости массивов горных пород по Методике на основе анализа распределения массовой трещиноватости

Table 5. Classification of the stability of rock masses according to the Methodology based on the analysis of the distribution of mass fracturing

Наименование класса устойчивости (по углу падения относительно угла наклона ствола выработки) / наименование подкласса устойчивости (по углу между азимутами простирания выработки и системы трещин)	Благоприятный (-60...120° и +60...120°)	Неблагоприятный (-30...59° и +30...59°) (-121...150° и +121... 50°)	Весьма неблагоприятный (0–29° и 0–29°) (-151...180° и +151...180°)
Устойчивый (0–29°)	Ia	Iб	Iв
Слабоустойчивый (30–59°)	IIa	IIб	IIв
Неустойчивый (60–90°)	IIIa	IIIб	IIIв



Таблица 6. Сопоставление классов устойчивости горного массива по трем методикам
Table 6. Comparison of rock mass stability classes using three methods

Методика на основе структурных параметров		Методика многопараметрической классификации З.Т. Бенявски		Методика на основе анализа распределения массовой трещиноватости		
Класс	Наименование класса	Класс	Наименование класса	Класс	Наименование подкласса	Наименование класса
А	Благоприятный	I	Очень хорошая скала	Ia	Благоприятный	Устойчивый
		II	Хорошая скала	Iв	Весьма неблагоприятный	Устойчивый
				Iб	Неблагоприятный	Устойчивый
		III	Средняя скала	IIб	Неблагоприятный	Слабоустойчивый
				IIa	Благоприятный	Слабоустойчивый
Б	Неблагоприятный	IV	Плохая скала	IIIa	Благоприятный	Неустойчивый
				IIв	Весьма неблагоприятный	Слабоустойчивый
В	Весьма неблагоприятный	V	Очень плохая скала	IIIв	Весьма неблагоприятный	Неустойчивый
				IIIб	Неблагоприятный	Неустойчивый

существующих горных выработках дает очень усредненную картину в силу высокого влияния механического воздействия на породы при проходке ствола выработки. Наличие большого количества открытых мелких трещин на стенках выработки, проявившихся при взрывных работах и механизированной проходке, занижает основные структурные показатели системы (RQD и среднее расстояние между трещинами), что приводит к систематическому занижению класса устойчивости, то есть ухудшению прогноза устойчивости.

Частым явлением при применении Методики многопараметрической классификации З.Т. Бенявски на существующие горные выработки является наличие обширных областей с классами устойчивости IV и V, то есть прогнозное безаварийное существование такой выработки без специальных систем крепи не превышает суток, что не всегда подтверждается фактическими наблюдениями. Или обратный случай, когда вертикальные системы трещин с простираем параллельным оси выработки дают неоправданно хорошие показатели. В таких случаях для более точного прогноза необходимы дополнительные исследования горных выработок для уточнения класса устойчивости массива горных пород по Методике на основе анализа распределения массовой трещиноватости.

При одновременном исследовании одних и тех же блоков массива горных пород, по описанным выше трем методикам, получается

следующая картина сопоставления классов устойчивости (табл. 6).

Приведенная выше таблица сравнения методик оценки устойчивости существующих горных выработок позволяет скорректировать общие выводы прогноза устойчивости как в худшую, так и в лучшую сторону. Так, часто прогноз устойчивости по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски показывает плохие результаты, несоответствующие реальной геологической ситуации. В этом случае, на основе сопоставления результатов по разным методикам, мы можем откорректировать окончательный класс устойчивости в сторону увеличения. Таким образом, плохая скала с классом IV по Методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски (класс Б по Методике на основе структурных параметров), может быть отнесена к классу IIIa (благоприятная, неустойчивая) согласно Методике на основе анализа распределения массовой трещиноватости (см. табл. 1).

Закключение

Проведенный сравнительный анализ вышеописанных методик позволяет говорить о необходимости их комплексного применения с целью максимально корректного определения класса устойчивости горного массива для прохождения в нем горной выработки. При этом на начальных стадиях разработки во избежание больших дополнительных затрат



достаточно оценки состояния массива горных пород на основе анализа только структурных параметров, так называемой рейтинговой классификации¹.

На ключевых участках со сложными структурно-геологическими условиями для корректировки общих выводов прогноза устойчивости необходимо одновременное применение всех вышеописанных методик. При этом возникает необходимость выполнения допол-

нительных полевых исследований по четко оговоренным методикам: ориентированное бурение разведочных скважин, отбор монолитов ненарушенного сложения и лабораторные исследования физико-механических и деформационных свойств грунтов. И, как следствие, все полученные результаты должны рассматриваться как набор сигналов для принятия проектных решений об укреплении горных выработок на конкретных участках.

Список источников

1. Кузьмин Е.В., Узбекова А.Р. Рейтинговые классификации массивов скальных пород: предпосылки создания, развитие и область применения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. № 4. С. 201–202. EDN: INTNKV.
2. Кузьмин Е.В., Узбекова А.Р. Самообрушение руды при подземной добыче. М.: Изд-во МГГУ, 2006. 283 с.
3. Абрамкин Н.И., Ефимов В.И., Мансуров П.А. Эмпирические методики оценки состояния массива горных пород // Известия уральского государственного горного университета. 2021. № 4. С. 109–115. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-4-109-115>. EDN: ELNONZ.
4. Чернов А.Ю., Бузов С.А. Применение рейтинговых классификаций массивов горных пород на основе общепринятой системы документации горных выработок // Сергеевские чтения: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (г. Пермь, 2–4 апреля 2019). Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2019. С. 603–608. EDN: ZCOYLR.
5. Deere D.U., Deere D.W. The Rock quality designation (RQD) index in practice // Rock Classification Systems for Engineering Purposes / ed. L. Kirkaldie. West Conshohocken: ASTM International, 1988. P. 91–101. <https://doi.org/10.1520/STP48465S>.
6. Terzaghi R.D. Sources of error in joint surveys // Geotechnique. 2009. Vol. 15. Iss. 3. P. 287–304. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.3.287>.
7. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of rock support // Rock Mechanics and Rock Engineering. 1974. Vol. 6. Iss. 4. P. 189–236. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>.
8. Haines A., Terbrugge P., Carrieri G. Preliminary estimation of rock slope stability using rock mass classification systems // Proc. 7th Cong. on Rock Mechanics (Aachen, 16–20 September 1991). Aachen: A.A. Balkema, 1991. Vol. 2. P. 887–892. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)92931-F](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)92931-F).
9. Bieniawski Z.T. Engineering rock mass classifications. New York: John Wiley and Sons, 1989. 251 p.
10. Romana M. New adjustment rating for application of the Bieniawski classifications to slopes // Proceedings of International Symposium on the Role of Rock Mechanics (Zacatecas, 1985). Zacatecas: International Society of Rock Mechanics, 1985. P. 49–53.
11. Кузьмин Е.В., Узбекова А.Р. Рейтинговые классификации массивов горных пород и их практическое применение // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 5. С. 181–185. EDN: ICJNJJ.
12. Рыбин В.В., Губинский Н.О. Определение рейтинга массива горных пород по классификации Д. Лобшира для условий карьеров ОАО «Апатит» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 3. С. 140–143. EDN: PUXDSF.
13. Laubscher D.H. A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 1990. Vol. 90. P. 257–273.
14. Jacubec J., Laubscher D. The MRMR rock mass rating classification system in mining practice // MassMin (Brisbane, 29 October – 2 November 2000). Brisbane, 2000. P. 413–421.
15. Laubscher D.H., Jacubec J. The MRMR Rock Mass Classification for jointed rock masses // Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Histories / eds. W.A. Hustrulid, R.L. Bullock. Littleton: SME, 2001. P. 455–463.
16. Bieniawski Z.T. Determining rock mass deformability: experience from case histories // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1978. Vol. 15. Iss. 5. P. 237–247. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)90956-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)90956-7).
17. Nicholason G.A., Bieniawski Z.T. A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification // International Journal of Mining and Geological Engineering. 1990. Vol. 8. P. 181–202. <https://doi.org/10.1007/BF01554041>.
18. Barton N. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2002. Vol. 39. Iss. 2. P. 185–216. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00011-4).

References

1. Kuzmin E.V., Uzbekova A.R. Rating classifications of rock masses: formation background, development and application field. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2004;4:201-202. (In Russ.). EDN: INTNKV.



2. Kuzmin E.V., Uzbekova A.R. *Self-destruction of ore during underground mining*. Moscow: Moscow State Mining University; 2006, 283 p. (In Russ.).
3. Abramkin N.I., Efimov V.I., Mansurov P.A. Empirical techniques for assessing rock massif condition. *News of the Ural State Mining University*. 2021;4:109-115. (In Russ.). <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-4-109-115>. EDN: ELNONZ.
4. Chernov A.Y., Buzov S.A. Using rock mass rating classifications based on the mining customary documentation system. In: *Sergeevskie chteniya: materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii = Sergeev Readings: Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology*. 2–4 April 2019, Perm. Perm: Perm State University; 2019, p. 603-608. (In Russ.). EDN: ZCOYLR.
5. Deere D.U., Deere D.W. The Rock quality designation (RQD) index in practice. In: Kirkaldie L. (ed.). *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*. West Conshohocken: ASTM International; 1988, p. 91-101. <https://doi.org/10.1520/STP48465S>.
6. Terzaghi R.D. Sources of error in joint surveys. *Geotechnique*. 2009;15(3):287-304. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.3.287>.
7. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of rock support. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1974;6(4):189-236. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>.
8. Haines A., Terbrugge P., Carrieri G. Preliminary estimation of rock slope stability using rock mass classification systems. In: *Proc. 7th Cong. on Rock Mechanics*. 16–20 September 1991, Aachen. Aachen: A.A. Balkema; 1991, vol. 2, p. 887-892. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)92931-F](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)92931-F).
9. Bieniawski Z.T. *Engineering rock mass classifications*. New York: John Wiley and Sons; 1989, 251 p.
10. Romana M. New adjustment rating for application of the Bieniawski classifications to slopes. In: *Proceedings of International Symposium on the Role of Rock Mechanics*. Zacatecas, 1985. Zacatecas: International Society of Rock Mechanics; 1985, p. 49-53.
11. Kuzmin E.V., Uzbekova A.R. Rating classifications of rock masses and their practical application. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2005;5:181-185. (In Russ.). EDN: ICJNJJ.
12. Rybin V.V., Gubinsky N.O. Defining rock mass rating according to D. Lobshir's classification for Apatit OJSC open pit conditions. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2012;3:140-143. (In Russ.). EDN: PUXDSF.
13. Laubscher D.H. A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 1990;90:257-273.
14. Jacubec J., Laubscher D. The MRMR rock mass rating classification system in mining practice. In: *MassMin*. 29 October – 2 November 2000, Brisbane. Brisbane; 2000, p. 413-421.
15. Laubscher D.H., Jacubec J. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses. In: Hustrulid W.A., Bullock R.L. (eds). *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Histories*. Littleton: SME; 2001, p. 455-463.
16. Bieniawski Z.T. Determining rock mass deformability: experience from case histories. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1978;15(5):237-247. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)90956-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)90956-7).
17. Nicholoso G.A., Bieniawski Z.T. A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification. *International Journal of Mining and Geological Engineering*. 1990;8:181-202. <https://doi.org/10.1007/BF01554041>.
18. Barton N. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2002;39(2):185-216. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00011-4).

Информация об авторах / Information about the authors



Матвеева Ирина Викторовна,

кандидат геолого-минералогических наук,
заместитель руководителя департамента инженерной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,

✉ matveeva.i.2010@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-8621-5560>

Irina V. Matveeva,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Deputy Head of the Department of Engineering Geology,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,

✉ matveeva.i.2010@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-8621-5560>



Шигарова Татьяна Олеговна,
инженер департамента инженерной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
shigarova@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0008-5305-0251>
Tatiana O. Shigarova,
Engineer of the Department of Engineering Geology,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
shigarova@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0008-5305-0251>



Матвеев Олег Александрович,
ведущий инженер департамента инженерной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
matveev_oleg68@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-8053-0782>
Oleg A. Matveev,
Lead Engineer of the Department of Engineering Geology,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
matveev_oleg68@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-8053-0782>

Вклад авторов / Contribution of the authors

И.В. Матвеева – написание текста.

Т.О. Шигарова – подготовка рисунков и таблиц, перевод на английский язык.

О.А. Матвеев – полевые исследования и камеральная обработка полевых материалов.

Irina V. Matveeva wrote the text of the article.

Tatiana O. Shigarova prepared figures and tables, translated the article into English.

Oleg A. Matveev performed field research and office analysis of field materials.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 28.08.2024; одобрена после рецензирования 10.09.2024; принята к публикации 20.09.2024.

The article was submitted 28.08.2024; approved after reviewing 10.09.2024; accepted for publication 20.09.2024.