УДК 550.8.05 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-3-90-99

Оценка степени и характера трещиноватости массива пород для построения прогнозной инженерно-геологической модели месторождения

Семен Александрович КОРЧАК*
Ирина Валерьевна АБАТУРОВА**
Иван Андреевич САВИНЦЕВ***
Любовь Александровна СТОРОЖЕНКО****

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность и цель работы. На сегодняшний день подавляющее большинство твердых полезных ископаемых добывается открытым способом. Для обеспечения эффективности отработки месторождений необходимо давать комплексную оценку и прогноз инженерно-геологических условий месторождения на основе изучения и анализа главных факторов, определяющих устойчивость массива пород. В массивах скальных пород одними из таких факторов являются степень и характер трещиноватости массива. Целью изучения является построение прогнозной инженерно-геологической модели на основе полученных данных.

Методика исследования. Для проведения качественных и полноценных исследований предложена методика комплексного изучения трещиноватости массива, основанная на документации ориентированного и неориентированного керна. Для оценки полученной информации предложен поэтапный подход определения количественных и качественных характеристик трещиноватости скального массива.

Результаты исследований. Предлагаемый комплексный подход к изучению трещиноватости был применен на месторождении Малмыж, расположенном в Хабаровском крае. На первом этапе оценки степени и характера трещиноватости установлены: качественные параметры – характер поверхности трещин, минеральный заполнитель, генезис; количественные параметры – модуль кусковатости, модуль трещиноватости, показатель качества пород; дана классификация массива по степени трещиноватости и определены основные закономерности ее распространения в разрезе; получены коэффициенты зон дробления. На втором этапе произведена инженерно-геологическая документация ориентированного керна с последующей обработкой полученных данных в ПО Dips Rocscience. Результатом выполненных исследований явилась прогнозная инженерно-геологическая модель месторождения с выделением в разрезе участков с разной вероятностью проявления механизмов обрушения массива.

Выводы. Качественная прогнозная инженерно-геологическая модель месторождения является результатом применения комплексного подхода к оценке степени и характера трещиноватости. Применение ориентированного керна позволяет получить пространственные характеристики основных систем трещин и установить их влияние на устойчивость массива при отработке путем выделения наиболее опасных участков.

Ключевые слова: инженерно-геологические условия месторождения, трещиноватость, массив горных пород, инженерно-геологическая модель, устойчивость массива, ориентированный керн, прогноз, механизмы обрушения массива.

Актуальность

В настоящее время довольно остро стоят вопросы инженерной защиты бортов карьеров. Проблема связана с тем, что недропользователи стремятся к минимизации затрат на эксплуатацию месторождений. Это проявляется тенденцией к увеличению глубины карьеров, генерального угла их бортов и уменьшению коэффициента вскрыши. В результате этого все чаще проявляются обрушения. Мелкие обрушения (объемом до 1000 м^3) не приносят существенного ущерба. Но если обрушение затрагивает сразу несколько уступов карьера, ущерб может исчисляться сотнями миллионов рублей.

Таким образом, тенденции к увеличению глубины карьеров, снижению вскрышных работ за счет увеличения углов откосов бортов, несомненно, приведут к новым рискам с точки зрения потери устойчивости уступов и бортов карьеров [1, 2]. Поэтому проектирование должно учитывать современные инженерно-геологические условия месторождения и базироваться на всесторонней оценке состояния массива горных пород [3, 4].

Результатом такой оценки должна стать прогнозная инженерно-геологическая модель месторождения, отражающая участки разной степени устойчивости пород в бор-

✉korchak-semen@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-7175-289X
** gingeo@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-4829-3204
***ivan.savintsev@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-4760-9900
****stor_luba@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-4185-956X

тах карьера. При этом главной целью построения модели должно являться не только выделение опасных с точки зрения устойчивости участков, но и установление основных типов деформаций [5–7].

Объективность построения модели обеспечивается получением данных о степени и характере трещиноватости массива пород, получить которую на этапах разведки месторождения можно, используя только комплексный подход.

Теоретическое обоснование проблемы. К настоящему времени проведено большое количество научных исследований в области изучения массивов горных пород в целом, а также их трещиноватости. Такими исследованиями занимались Ф. П. Саваренский, П. Н. Панюков, Г. Л. Фисенко, Р. Гудман, А. Д. Сашурин, В. Г. Зотеев, М. М. Протодьяконов и другие. Оценкой устойчивости скальных массивов занималось множество зарубежных исследователей, среди которых основатели международных классификаций расчетов устойчивости массива Z. T. Bieniawski, D. H. Laubscher [8], J. Jakubec. Исследования в данном направлении продолжаются и в последние годы [9–12]. Проведенные исследования основываются преимущественно на изучении степени трещиноватости непосредственно в массиве пород [13–17]. Это в значительной степени облегчает задачу получения достоверной информации и построения модели на этой основе. Однако на этапах разведки месторождения степень трещиноватости может быть оценена с достаточной полнотой только по керну скважин, при отсутствии в непосредственной близости обнажений пород [18, 19]. Поэтому только использование комплекса методов позволит построить объективную и качественную инженерно-геологическую модель.

Методика работ

Предлагаемый к рассмотрению комплексный подход включает в себя оценку степени трещиноватости массива на основе двух методов [20]. Первый – инженерно-геологическая документация керна скважин неориентированного бурения, что позволяет в целом оценить качественно и количественно степень трещиноватости, но без возможности установления основных систем трещин и элементов их залегания [19].

Второй – инженерно-геологическая документации керна скважин ориентированного бурения [18], что позволяет получить информацию об основных системах трещин, их пространственной ориентировке (угол и азимут падения), которые неоднозначно влияют и на устойчивость массива пород. Здесь также стоит отметить, что при наличии обнажений необходимо выполнять их картирование с целью установления протяженности трещин, что будет определять их влияние на устойчивость бортов и уступов.

Оценка полученной информации проводится поэтапно:

I этап – оценка качественных параметров трещиноватости – генезис, положение по отношению к оси керна, минеральный заполнитель;

II этап – обработка данных количественных параметров Мк, Мт, RQD, классифицирование массива по степени трещиноватости;

III этап – расчет коэффициентов зон ослабления;

IV этап – установление основных закономерностей распространения степени трещиноватости; построение инженерно-геологической модели месторождения;

V этап – обработка данных ориентированного керна в программном комплексе Dips Rocscience;

VI этап – построение прогнозной инженерно-геологической модели месторождения с использованием кинематического анализа с применением современных программных комплексов.

Реализация методики

Примером реализации предложенной методики является один из участков (Рудный участок 1) месторождения в Хабаровском крае. Всего данное месторождение включает в себя три самостоятельных рудных участка. В геологическом отношении разрез месторождения имеет двухэтажное строение: верхний представлен дисперсными грунтами – элювиально-делювиального, элювиального генезиса, нижний представлен скальными грунтами: интрузивными и терригенно-осадочными. В структурном плане участок находится на пересечении дорудной северо-восточной системы разломов с поперечными разломами северо-западного простирания. В скважинах разломы представлены зонами дроблениями, брекчирования и трещиноватости.

Ключевыми факторами, которые определяют инженерно-геологические условия отработки месторождения, являются степень трещиноватости, раздробленности пород, наличие неблагоприятно ориентированных зон и поверхностей ослабления, морфология стенок трещин, минеральный состав заполнителя.

Согласно приведенной ранее методике, первым этапом в получении информации о трещиноватости массива является полевое описание ориентированного и неориентированного керна, в ходе которого фиксируются основные качественные характеристики трещин – устанавливается генезис трещин, характер поверхности трещин, а также наличие минерального заполнителя, который может как ослаблять, так и укреплять массив. В пределах исследуемого участка для массива пород характерны открытые и залеченные трещины. Тектонические трещины развиты до глубины изучения массива пород. Экзогенные ограничены глубиной 40–50 м. Поверхности открытых трещин преимущественно волнистые шероховатые (51,4 %), либо ровные шероховатые (44,8 %), единично встречаются зеркала скольжения, края трещин ровные сколовые, реже отмечаются извилистые рваные (рис. 1). Поверхности открытых трещин покрыты гидроокислами железа, корочками кварц-карбонатного материала, хлорита, серицита (рис. 2). Из них ослабляющими массив месторождения выступают гидроокислы железа и марганца, слюдистые минералы и аргиллизит, укрепляющими же – кварц-карбонатный и сульфидный материалы. По отношению к оси керна преобладающими являются углы 30–60° и 60–90° (рис. 3).

Второй этап, как правило, проводится неразрывно с первым. Здесь по керну фиксируются количественные параметры – модуль трещиноватости $M_т$, модуль кусковатости $M_к$, показатель качества пород RQD. Также на данном этапе отмечаются мощности зон ослабления с описанием их гранулометрического состава. Тем самым формируется первичная база данных, которая подлежит обработке в виде диаграмм распределения (рис. 4). Классификация массива пород по степени трещиноватости выполнена согласно рекомендациям ВСЕГИНГЕО. Анализ показал, что преобладающим классом в массиве пород являются среднетрещиноватые породы (38 %), слабо- и сильнотрещино-

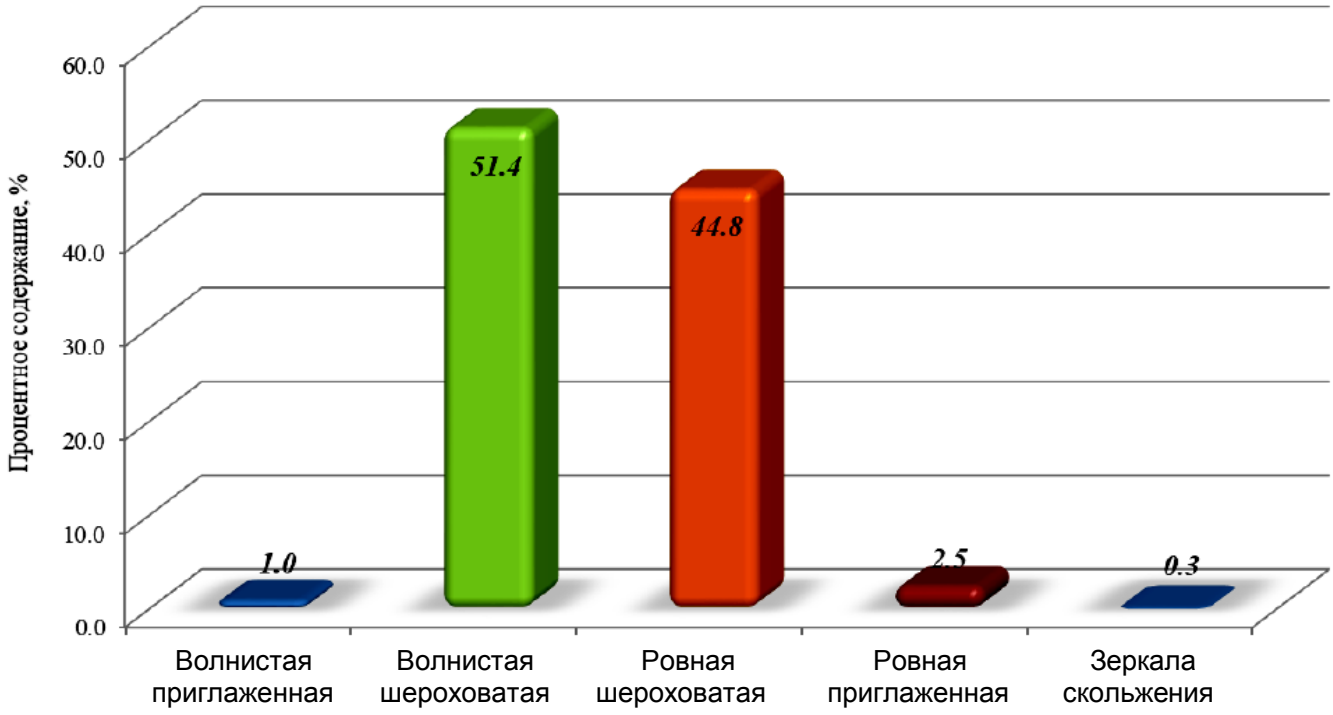


Рисунок 1. Гистограмма преобладающих видов поверхностей открытых трещин в массиве пород Рудного участка 1, %
Figure 1. Histogram of the predominant types of surfaces of open fractures in the rock mass of the Ore area 1, %

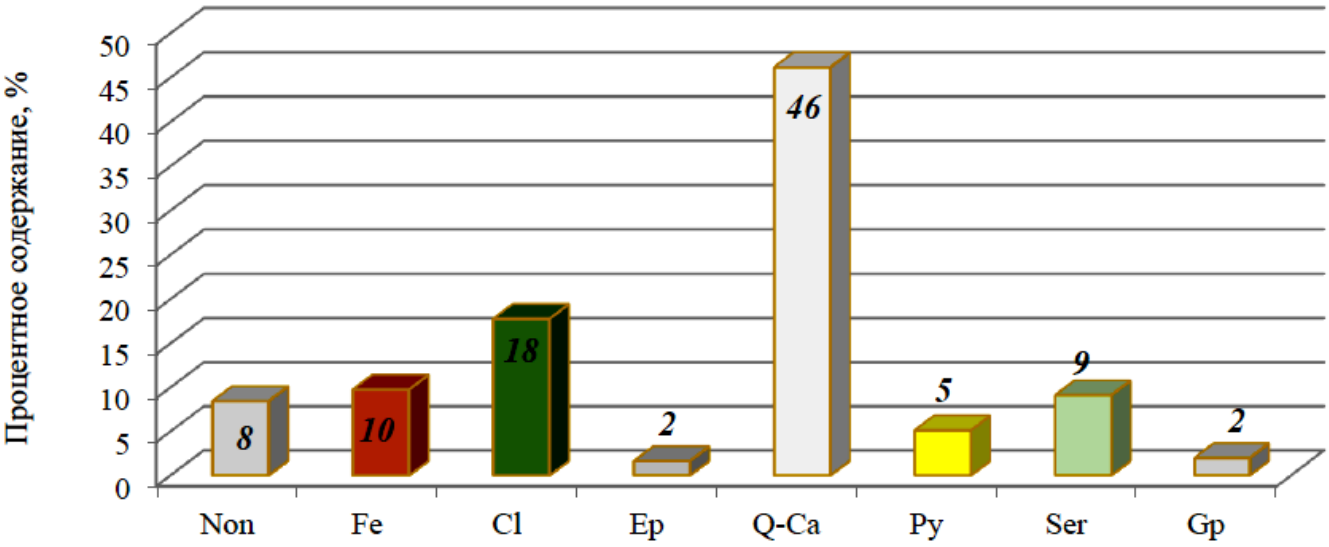


Рисунок 2. Гистограмма процентного содержания минеральных заполнителей открытых трещин карьера Рудного участка 1
Figure 2. Histogram of the percentage of mineral fillers for open cracks in the Ore area 1 quarry

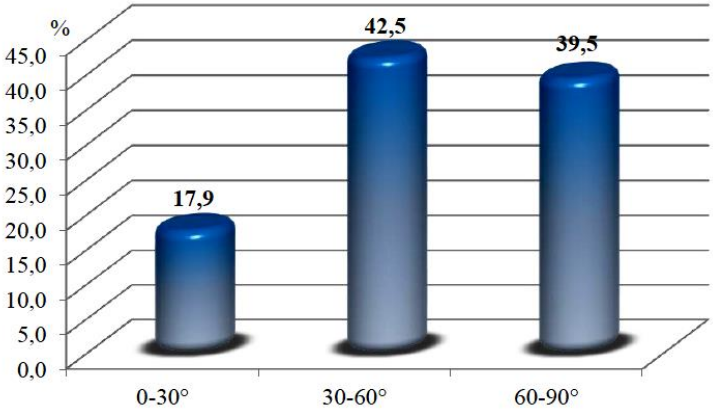


Рисунок 3. Гистограмма ориентировки преобладающих углов трещин по направлению к оси керна, %
Figure 3. Histogram of the orientation of the prevailing fracture angles towards the core axis, %

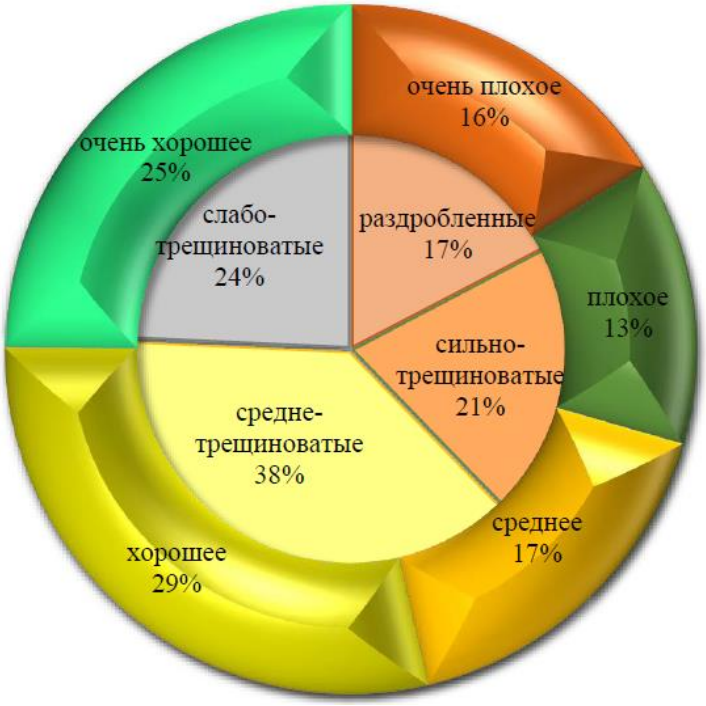


Рисунок 4. Процентное содержание в скважине пород разного качества RQD и степени трещиноватости $M_т$ Рудного участка 1
Figure 4. Percentage of rocks of different quality RQD and degree of fracturing M_t in the well in Ore Area 1

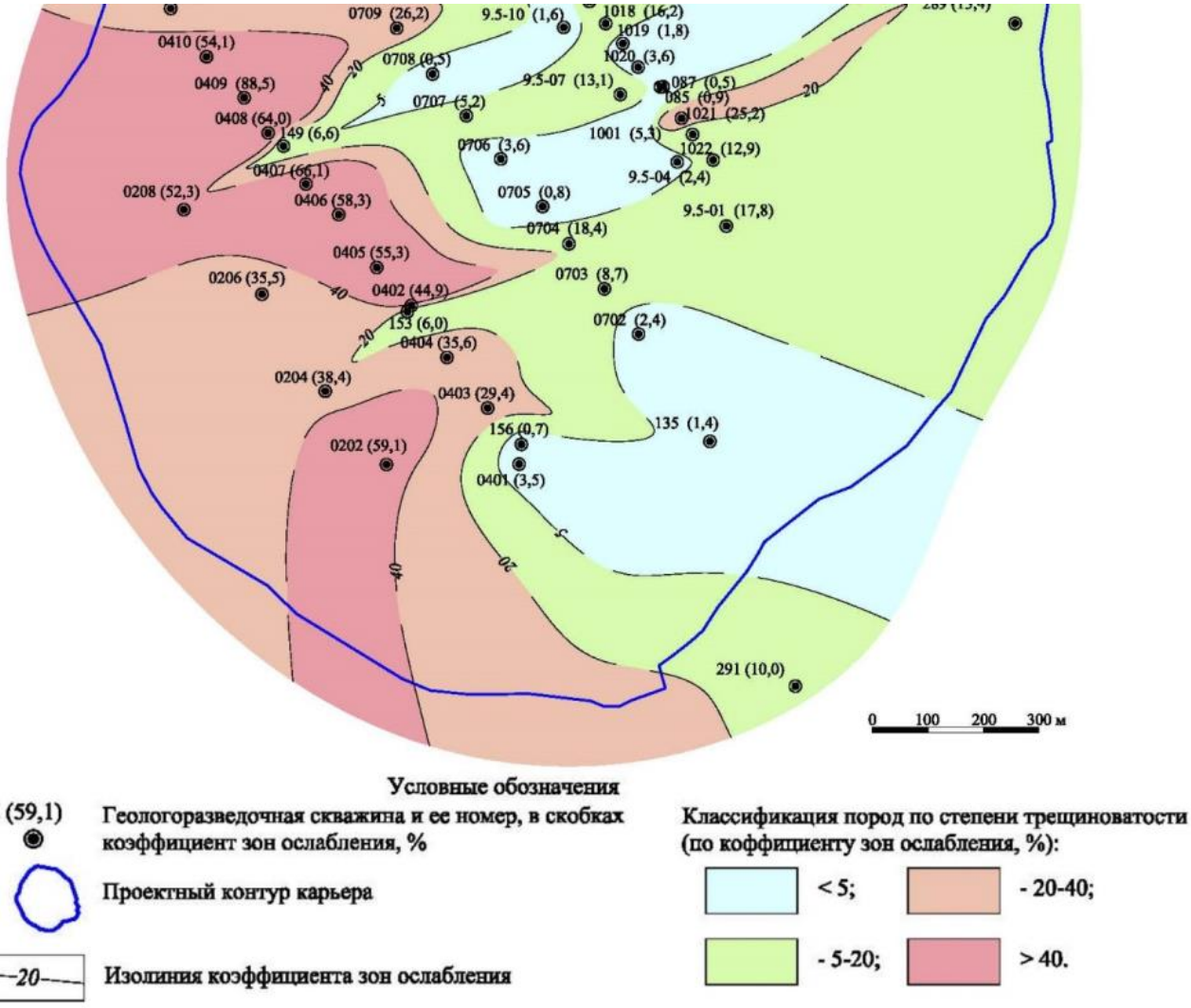


Рисунок 5. Фрагмент схемы изолиний коэффициента зон ослабления по скважинам в пределах Рудного участка 1
Figure 5. Fragment of the isolines of the coefficient of weakening zones for wells within the Ore area 1

ватые примерно равны между собой – 24 и 21 %, раздробленные составляют 17 % (рис. 4).

Третий этап – расчет коэффициентов зон ослабления – выполняется с целью установления основных закономерностей пространственного положения зон ослабления, а в дальнейшем и для окончательного установления класса устойчивости пород и районирования массива пород. Для этого рассчитываются количественные показатели, такие как коэффициент зон ослабления $K_{осл}$, который представляет собой отношение суммарной мощности зон ослабления к вскрытой мощности разреза, и модуль зоны ослабления, который представляет собой отношение количества зон ослабления к вскрытой мощности и показывает количество зон ослабления на один метр массива.

Все перечисленные параметры заносятся в базу данных. Для визуализации полученных расчетов строятся карты и схемы зон ослабления (рис. 5), также данные могут найти отражение на разрезах и в трехмерных моделях. Зоны ослабления в исследуемом массиве развиты очень неравномерно. Подсчитанный коэффициент зон ослабления меняется от 0,5–0,6 до 88,5. Количество вскрытых зон достигает значений 44–80, средняя мощность зон ослабления достигает 5–6 м.

На четвертом этапе осуществляется построение инженерно-геологической модели месторождения в виде разрезов с отражением распределения степени трещиноватости пород массива (рис. 6).

Полученная на предыдущих этапах информация о степени трещиноватости дополняется важнейшими параметрами с точки зрения выбора схем расчетов устойчивости – пространственная ориентировка основных систем трещин и поверхностей ослабления. База данных, полученная при структурном описании ориентированного керна с подробной характеристикой каждой трещины, – азимуты и углы падения, характер поверхности трещин, минеральный заполнитель – обрабатывается в различных программных комплексах, одним из которых является Dips Rocscience. В данной программе выполняется построение стереограмм трещиноватости с выделением основных систем трещин (рис. 7). Благодаря анализу результатов документации ориентированного керна по четырем специализированным инженерно-геологическим скважинам в пределах Рудного участка 1, установлено, что в массиве пород преобладают трещины северо-западного простирания, имеющие углы падения 60–90°. Для массива характерно наличие трех систем трещин: I система – азимут падения 290–325°, угол падения 50–80°; II система – азимут падения 17–40 (197–220°), угол падения 76–90°; III система – азимут падения 230–250°, угол падения 60–80°.

Завершающим этапом изучения трещиноватости месторождения является построение прогнозной инженерно-геологической модели с использованием кинематического анализа (рис. 8), реализуемого в ПО Dips Rocscience. На построенной инженерно-геологической модели по результатам обработки данных о трещиноватости массива

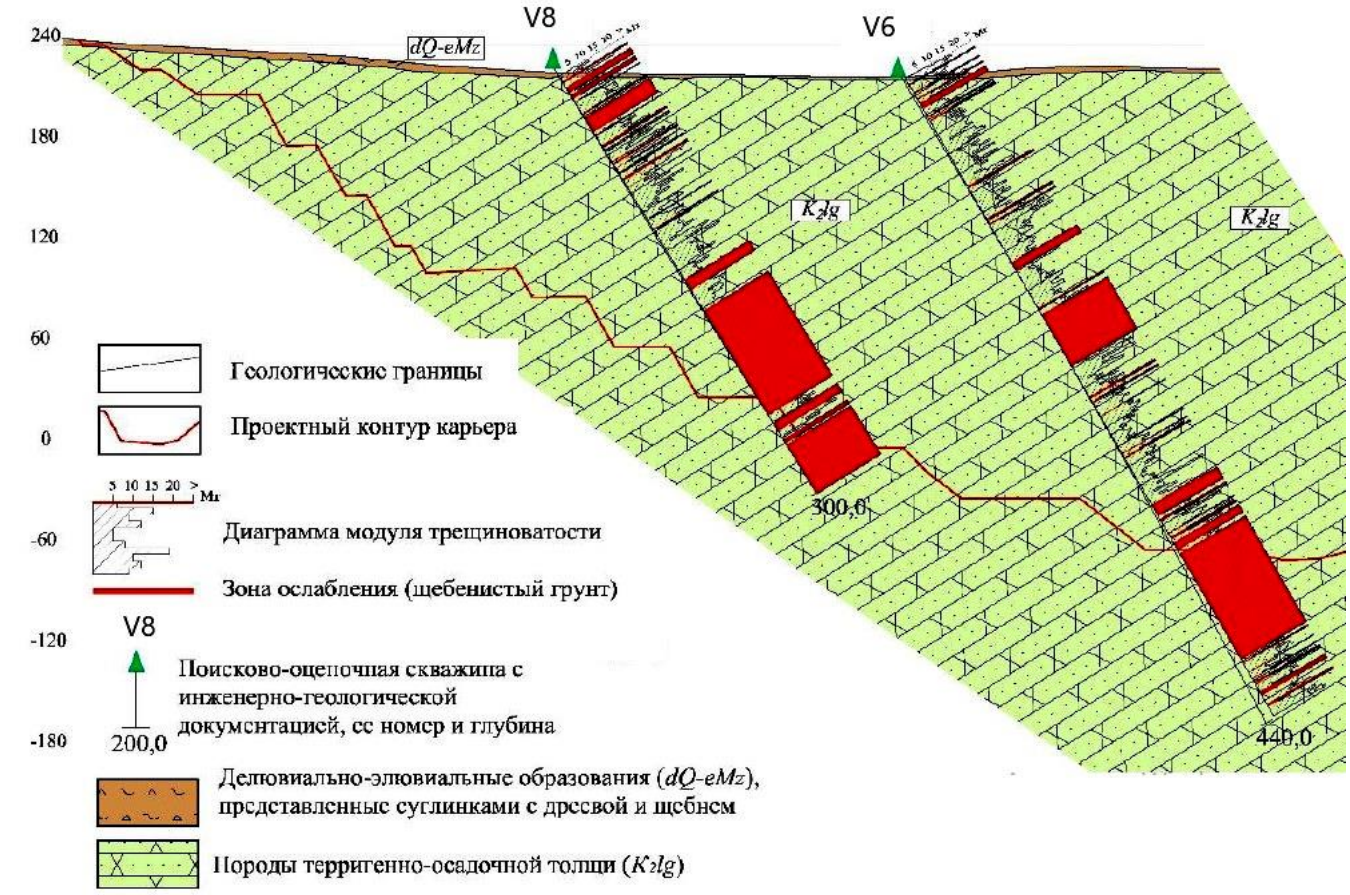


Рисунок 6. Фрагмент схематического разреза с оценкой степени трещиноватости массива пород
Figure 6. A fragment of a schematic section with an assessment of the degree of fracturing of the rock mass

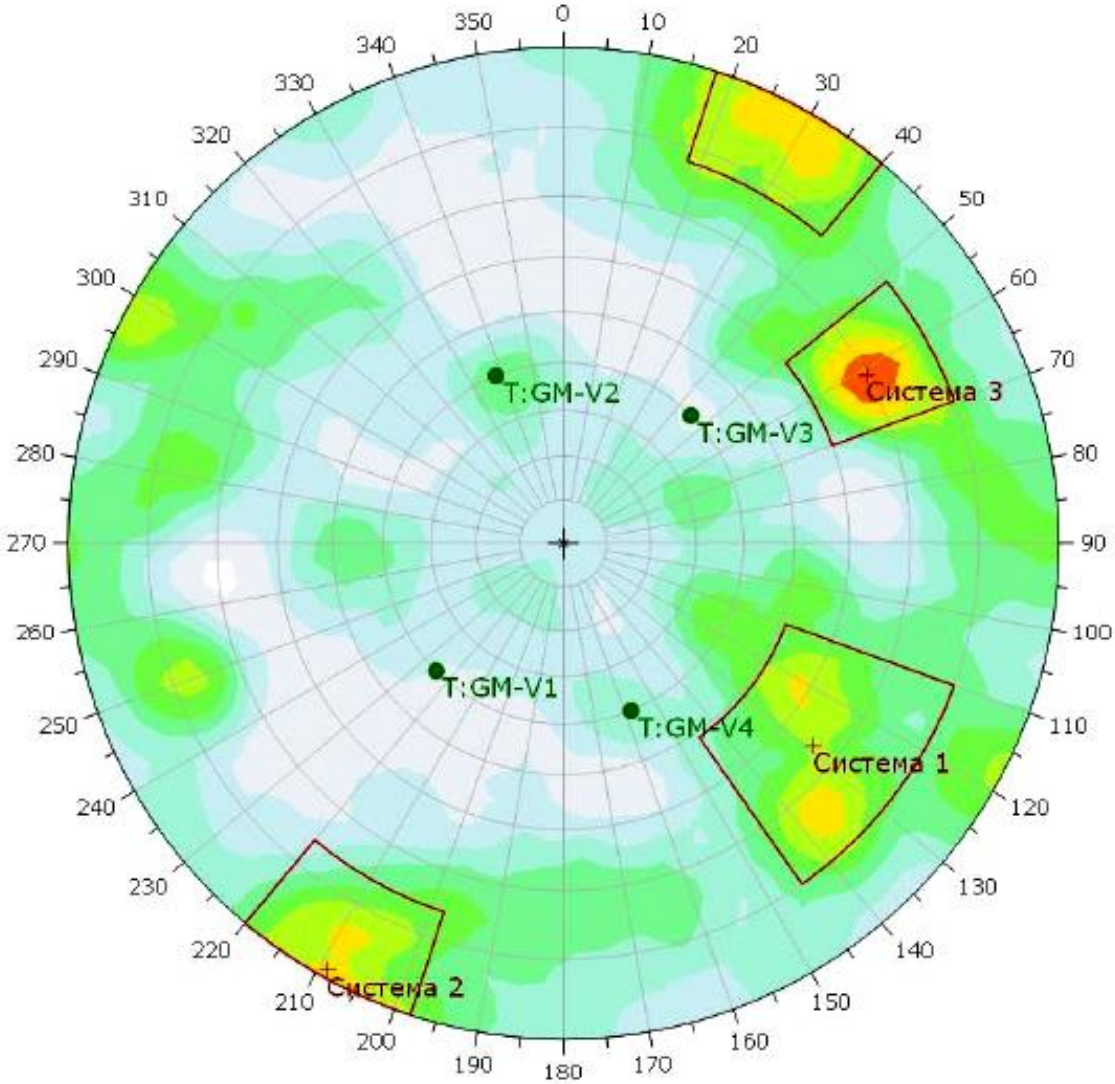


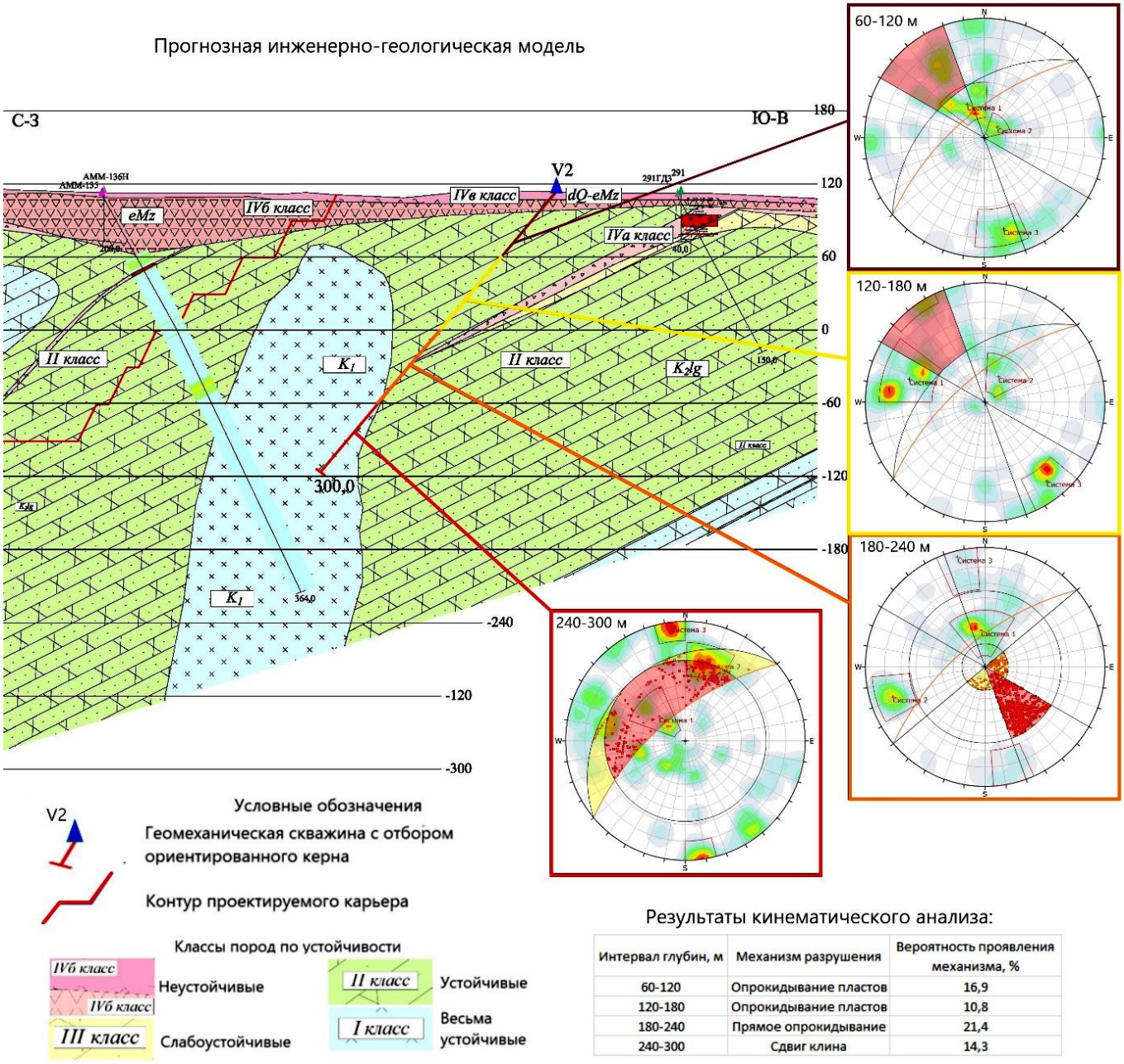
Рисунок 7. Стереограмма открытой трещиноватости по Рудному участку 1
Figure 7. Stereogram of open fracturing in Ore area 1

(в том числе с учетом прочностных характеристик) выделены классы устойчивости пород, уточненные с помощью кинематического анализа. Анализ заключается в выявлении возможных механизмов разрушения откосов. Параметры прочности учитываются в минимальной степени, поскольку определяющей в анализе является взаимная ориентация плоскостей ослабления и поверхности выемки [7]. Разрушения откосов, обусловленные смещениями скальных блоков, происходят в виде одного или двух из трех основных механизмов деформирования: сдвиг по плоскости (Planar Sliding), сдвиг клина (Wedge Sliding) и опрокидывание (Direct Topling – прямое опрокидывание, Flexural Topling – опрокидывание пластов). На одном из исследуемых участков массива (юго-восточный борт) кинематический анализ выполнен для разных интервалов глубин, для которых выявлены наибольшие вероятности проявления механизмов разрушения массива. Для интервала глубин 60–120 м наиболее вероятно проявление механизма опрокидывания пластов (16,9 %); для глубин 120–180 м – также механизма опрокидывания пластов (10,8 %); для глубин 180–240 м – механизма прямого опрокидывания (21,4 %); для глубин 240–300 м – механизма сдвига клина (14,3 %). По результатам проведенного анализа можно сделать вывод, что в целом вероятность проявления механизмов невысокая, однако при вскрытии массива указанные механизмы могут реализоваться, что, несомненно, необходимо учитывать как при проектировании, так и при отработке.

Заключение

Использование комплексного подхода к оценке степени трещиноватости позволяет получить прогнозную инженерно-геологическую модель месторождения, на которой с учетом пространственной характеристики проектируемого объекта выделены опасные участки. Положение в разрезе опасных участков позволит еще на этапе проектирования обеспечить обоснованность проектно-технических решений и эксплуатационную надежность.

Однако полученные результаты, заложенные в базу данных, должны быть уточнены на этапе разработки в процессе горнотехнического мониторинга. Это позволит выполнить верификацию прогнозных решений и будет способствовать более точному пониманию проблемы.



Результаты кинематического анализа:

Интервал глубин, м	Механизм разрушения	Вероятность проявления механизма, %
60-120	Опрокидывание пластов	16,9
120-180	Опрокидывание пластов	10,8
180-240	Прямое опрокидывание	21,4
240-300	Сдвиг клина	14,3

Рисунок 8. Прогнозная инженерно-геологическая модель с кинематическим анализом и выделением классов устойчивости пород
Figure 8. Predictive engineering-geological model with kinematic analysis and identification of rock stability classes

Вклад авторов

Корчак С. А. – сбор теоретической информации, проведение и обработка результатов полевых исследований, анализ и выводы по проведенным исследованиям, оформление статьи.

Абатурова И. В. – постановка задачи исследования, методологическое обоснование проблемы исследования, анализ и выводы по проведенным исследованиям.

Савинцев И. А. – разработка методики проведения работ, получение данных для анализа, анализ результатов исследования.

Стороженко Л. А. – получение данных для анализа, оформление статьи.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сашурин А. Д., Панжин А. А. Современные проблемы и задачи геомеханики // ГИАБ. 2020. № 3-1. С. 188–198. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-188-198
2. Зотеев В. Г., Зотеев О. В. Нетипичные деформации бортов глубоких рудных карьеров и меры по их предотвращению // Горный журнал. 2007. № 1. С. 40–45.
3. Abaturova I. V., Storozhenko L. A., Pisetsky V. B., Savintsev I. A. Use of Geological and Structural Analysis in Evaluating Engineering and Geological Conditions of Mineral Deposits // Engineering and Mining Geophysics 2020. European Association of Geoscientists & Engineers. 2020. Vol. 2020. No. 1. P. 1–9. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051096
4. Abaturova I., Savintsev I., Storozhenko L., Borisikhina O. Ensuring the Sustainable Functioning of the Geotechnical System of Mineral Deposits in Difficult Engineering and Geological Conditions // 25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. European Association of Geoscientists & Engineers. 2019. Vol. 2019. No. 1. P. 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903464
5. Дунаев А. В. Геолого-структурная оценка карбонатитовых месторождений для прогнозирования в процессе их эксплуатации деформаций нерабочих уступов карьеров // ГИАБ. 2010. № 8. С. 394–395.
6. Korchak S. A., Abaturova I. V., Savintsev I. A. Kinematic Fracture Analysis as the Main Tool for Predicting the Mechanism of Deformation of a Rock Mass // Engineering and Mining Geophysics 2020. European Association of Geoscientists & Engineers. 2020. Vol. 2020. No. 1. P. 1–10. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051127
7. Бердинова Н. О., Съедина С. А., Шамганова Л. С., Калюжный Е. С. Прогнозирование деформаций уступов скального массива Куржункульского карьера с использованием кинематического анализа // ГИАБ. 2020. № 4. С. 58–68. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-4-0-58-68
8. Laubscher D. H., Jakubec J. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses // Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies / ed. by W. A. Hustrulid, R. L. Bullock // Underground mining methods: engineering fundamentals and international case studies. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2001. C. 475–481.
9. Wagner H. Deep mining: a rock engineering challenge // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019. Vol. 52. No. 5. P. 1417–1446. https://doi.org/10.1007/s00603-019-01799-4
10. Nicco M., Holley E. A., Hartlieb P., Kaunda R., Nelson P. R. Methods for characterizing cracks induced in rock // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018. Vol. 51. No. 7. P. 2075–2093. https://doi.org/10.1007/s00603-018-1445-x
11. Khatik V. M., Nandi A. K. A generic method for rock mass classification // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 10. Issue 1. P. 102–116. https://doi.org/10.1016/J.JRMGE.2017.09.007
12. Zhang Q., Huang X., Zhu H., Li J. Quantitative assessments of the correlations between rock mass rating (RMR) and geological strength index (GSI) // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. Vol. 83. P. 73–81. https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.09.015
13. Боос И. Ю., Юнаков Ю. Л., Патачаков И. В., Гришин А. А. Изучение структурных особенностей прибортового массива по 3D-модели откоса, построенной с применением мультикоптера // ГИАБ. 2021. № 12. С. 19–30. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_12_0_19
14. Серый С. С., Ермолов В. А., Дунаев А. В. Инженерно-геологическое районирование массивов скальных горных пород и прогноз деформаций уступов карьеров // ГИАБ. 2008. № 5. С. 157–164.
15. Зубков А. В., Сентябов С. В. Новые подходы к оценке устойчивости скальных массивов горных пород // ГИАБ. 2020. № 3-1. С. 68–77. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-68-77
16. Бакин В. А. Трещиноватость пород и влияние ее на устойчивость пород в горных выработках // ГИАБ. 2020. № S37. С. 21–30. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-11-37-21-30
17. Раимжанов Б. Р., Хасанов А. Р. Оценка структурной нарушенности массива горных пород по рейтинговым классификациям для рудников Зармитанской золоторудной зоны // ГИАБ. 2020. № 5. С. 115–127. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-5-0-115-127
18. Чужинов Д. Н., Рубчевский Ю. И., Малых М. Ю., Осецкий А. И., Колпаков В. Б., Симаков А. П. Ориентированный керн и скважинная телеметрия: опыт применения на объектах работ Полиметалла // Разведка и охрана недр. 2020. № 10. С. 34–39.
19. Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н. Прогноз устойчивости массива горных пород на основе анализа кернового материала разведочных скважин // ГИАБ. 2020. № 3-1. С. 216–223. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-216-223
20. Korchak S. A., Abaturova I. V., Savintsev I. A., Storozhenko L. A. Methodology for Studying the Fracturing of Rock Massifs at Different Stages of The study of Mineral Deposits // Engineering and Mining Geophysics 2021. European Association of Geoscientists & Engineers. 2021. Vol. 2021. No. 1. C. 1–11. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152066

Статья поступила в редакцию 21 июля 2022 года

УДК 550.8.05 http://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-3-90-99

Assessment of the degree and nature of rock mass jointing to build a predictive engineering-geological model of a field

Semen Aleksandrovich KORCHAK*
Irina Valer'evna ABATUROVA**
Ivan Andreevich SAVINTSEV***
Lyubov' Aleksandrovna STOROZHENKO****

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance and purpose of the research. To date, the vast majority of solid minerals are mined by open pit mining. To ensure the efficiency of mining deposits, it is necessary to give a comprehensive assessment and forecast of the engineering and geological conditions of a deposit based on the study and analysis of the main factors that determine the stability of the rock mass. In rock massifs, one of these factors is the degree and nature of rock mass jointing. The purpose of the study is to build a predictive engineering-geological model based on the data obtained.

Research methodology. To conduct high-quality and full-fledged studies, a method for a comprehensive study of rock jointing based on the documentation of oriented and non-oriented cores is proposed. To evaluate the information received, a step-by-step approach is proposed to determine the quantitative and qualitative characteristics of rock mass jointing.

Results. The proposed integrated approach to the study of jointing was applied at the Malmyzh field located in the Khabarovsk Territory. At the first stage of assessing the degree and nature of jointing, the following were established: qualitative parameters - the nature of the crack surface, mineral filler, genesis; quantitative parameters - lumpiness modulus, jointing modulus, rock quality index; the classification of the massif according to the degree of jointing is given and the main patterns of its distribution in the section are determined; coefficients of crushing zones are obtained. At the second stage, engineering-geological documentation of the oriented core was produced, followed by processing of the obtained data in the Dips Rocscience software. The result of the studies performed was a predictive engineering-geological model of a field with the identification of sections in the section with different probability of manifestation of the massif collapse mechanisms.

Conclusions. A high-quality predictive engineering-geological model of a field is the result of an integrated approach to assessing the degree and nature of jointing. The use of an oriented core makes it possible to obtain the spatial characteristics of the main jointing systems and to establish their influence on the stability of the massif during mining by highlighting the most dangerous areas.

Keywords: engineering-geological conditions of a deposit, jointing, rock mass, engineering-geological model, massif stability, oriented core, forecast, massif collapse mechanisms.

Authors' contributions

Korchak S.A. - collection of theoretical information, conducting and processing the results of field research, analysis and conclusions on the research, design of the article.

Abaturova I. V. - statement of the research problem, methodological substantiation of the research problem, analysis and conclusions on the research.

Savintsev I. A. - development of a methodology for conducting work, obtaining data for analysis, analysis of research results.

Storozhenko L. A. - obtaining data for analysis, article design.

Conflict of interest

There is no conflict of interest.

✉korchak-semen@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-7175-289X
** gingeo@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-4829-3204
***ivan.savintsev@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-4760-9900
****stor_luba@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-4185-956X

REFERENCES

1. Sashurin A. D., Panzhin A. A. 2020, Current problems and objectives in geomechanics. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], no. 3-1, pp. 188–198. (*In Russ.*) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-188-198
2. Zoteev V. G., Zoteev O. V. 2007, Atypical deformations of the sides of deep ore pits and measures to prevent them. *Gornyy zhurnal* [Mining journal] no. 1, pp. 40–45. (*In Russ.*)
3. Abaturova I. V., Storozhenko L. A., Pisetsky V. B., Savintsev I. A. 2020, Use of Geological and Structural Analysis in Evaluating Engineering and Geological Conditions of Mineral Deposits. Engineering and Mining Geophysics 2020. European Association of Geoscientists & Engineers, vol. 2020, no. 1, pp. 1–9. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051096
4. Abaturova I., Savintsev I., Storozhenko L., Borisikhina O. 2019, Ensuring the Sustainable Functioning of the Geotechnical System of Mineral Deposits in Difficult Engineering and Geological Conditions. 25th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. European Association of Geoscientists & Engineers, vol. 2019, no. 1, pp. 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903464
5. Dunaev A. V. 2010, Geological and structural assessment of carbonatite deposits for predicting deformations of non-working ledges of quarries during their operation. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], no. 8, pp. 394–395.
6. Korchak S. A., Abaturova I. V., Savintsev I. A. 2020, Kinematic Fracture Analysis as the Main Tool for Predicting the Mechanism of Deformation of a Rock Mass. Engineering and Mining Geophysics 2020. European Association of Geoscientists & Engineers, vol. 2020, no. 1. pp. 1–10. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051127
7. Berdinova N. O., S''edina S. A., Shamganova L. S., Kalyuzhny E. S. 2020, Prediction of strains in strong rock mass of the Kurzhunkul open pit mine by the kinematic analysis. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], no. 4, pp. 58–68. (*In Russ.*) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-4-0-58-68
8. Laubscher D. H., Jakubec J. 2001, The MRMR rock mass classification for jointed rock masses. Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies. W. A., Hustrulid R. L., Bullock (eds.). Littleton, CO: Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., pp. 475–481.
9. Wagner H. 2019, Deep mining: a rock engineering challenge. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 52, no. 5, pp. 1417–1446. https://doi.org/10.1007/s00603-019-01799-4
10. Nicco M., Holley E. A., Hartlieb P., Kaunda R., Nelson P. R. 2018, Methods for characterizing cracks induced in rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 51, no. 7, pp. 2075–2093. https://doi.org/10.1007/s00603-018-1445-x
11. Khatik V. M., Nandi A. K. A generic method for rock mass classification. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 10, issue 1, pp. 102–116. https://doi.org/10.1016/J.JRMGE.2017.09.007
12. Zhang, Q., Huang X., Zhu H., Li J. 2019, Quantitative assessments of the correlations between rock mass rating (RMR) and geological strength index (GSI). *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 83, pp. 73–81. https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.09.015
13. Boos I. Yu., Yunakov Yu. L., Patachakov I. V., Grishin A. A. 2021, Structural analysis of pit wall rock mass on 3D slope model constructed using a multicopter. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], no. 12, pp. 19–30. (*In Russ.*) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_12_0_19
14. Seryy S. S., Ermolov V. A., Dunaev A. V. 2008, Engineering-geological zoning of rock massifs and prediction of deformations of quarry ledges. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], no. 5, pp. 157–164 (*In Russ.*)
15. Zubkov A. V., Sentyabov S. V. 2020, New approaches to the assessment of stability of rock rock arrays. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], no. 3-1, pp. 68–77. (*In Russ.*) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-68-77
16. Bakin V. A. 2020, Fracturing of rocks and its influence on the stability of rocks in mine workings. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], no. S37, pp. 21–30. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-11-37-21-30
17. Raimjanov B. R., Khasanov A. R. 2020, Ratings of structural rock mass quality for Zarmitan gold mines. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], no. 5, pp. 115–127. (*In Russ.*) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-5-0-115-127
18. Chuzhinov D. N., Rubchebskiy Yu. I., Malykh M. Yu., Osetskiy A. I., Kolpakov V. B., Simakov A. P. 2020, Oriented core and downhole telemetry: application experience at Polymetal work sites. *Exploration and protection of mineral resources*, no. 10, pp. 34–39.
19. Sosnovskaya E. L., Avdeev A. N. 2020, Forecast of the stability of the array of gold ore deposits based on the analysis of core material from exploration core drilling wells. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], no. 3-1, pp. 216–223. (*In Russ.*) https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-216-223
20. Korchak S. A., Abaturova I. V., Savintsev I. A., Storozhenko L. A. 2021, Methodology for Studying the Fracturing of Rock Massifs at Different Stages of The study of Mineral Deposits. Engineering and Mining Geophysics 2021. European Association of Geoscientists & Engineers, vol. 2021, no. 1, pp. 1–11. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152066

The article was received on July 21, 2022