

УДК 622.834

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ
НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ**

В. А. Бабелло^{1,2}, М. В. Лизункин², С. В. Смолич², Е. К. Кондрашова²

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,*

E-mail: chita_bva@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²*Забайкальский государственный университет,*

E-mail: lmv1972@mail.ru, ул. Александрo-Заводская, 30, 672039, г. Чита, Россия

Представлены результаты исследований устойчивости бортов карьеров и разрезов на месторождениях Забайкальского края, выполненные на стадиях детальной разведки месторождений, проектирования и реконструкции карьеров. Отличительные особенности рассмотренных карьеров — тектоническая нарушенность пород массивов, включая зоны разломов, дробления и смятия. Ранее такие оценки проводились в рамках традиционных подходов, а выводы делались без оценки вероятности обрушения бортов и их участков. Современные правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров рекомендуют выполнять количественную оценку вероятности обрушения, основанную на вероятностном расчете, с помощью методов статистических испытаний, например метода Монте-Карло. Благодаря использованию метода статистических испытаний и полученным с его помощью результатам, можно не только количественно оценить возможные риски обрушения бортов карьеров, но и более четко сформулировать требования к точности исходных данных.

Месторождение, карьер, борт, устойчивость, метод Монте-Карло, моделирование, механические свойства

DOI: 10.15372/FTPRPI20250105

EDN: ACWRS�

Проблема устойчивости бортов карьеров и разрезов актуальна при проектировании горно-рудных предприятий, а также при дальнейшей разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. Наиболее важны при оценке устойчивости и безопасности горнотехнических сооружений параметры прочности горных пород. Однако традиционные методы расчета не предполагают, что исходные параметры механических свойств обладают существенной неопределенностью, являются случайными величинами и определяются как математические ожидания небольшой выборки (6 – 10) из совокупности параметров горного массива.

Большинство задач анализа устойчивости массивов горных пород использует упрощенные методы (Фисенко, Бишоп, Спенсера и др.) с фиксированными параметрами прочности пород. В то же время параметры механических свойств горных пород можно считать случайными величинами, зависящими от большого числа факторов, функциональные связи которых невозможно

определить для конкретного месторождения. Неопределенность средних значений механических свойств, характеризуемая высоким уровнем дисперсии, компенсируется введением больших значений коэффициента запаса устойчивости. Согласно [1], необходима оценка рисков развития критических деформаций бортов карьеров. По матрице рисков на основе вероятности и тяжести последствий оценивается уровень рисков (очень низкий, низкий, средний, высокий, очень высокий) с последующим выбором мер реагирования. В методических указаниях нет четкой методики расчета данных рисков. В настоящей работе предпринята попытка количественно оценить риски развития деформаций бортов карьеров Забайкальского края на основе метода статистических испытаний.

МЕТОД, МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Опыт российских и зарубежных исследователей показывает, что для подобного рода задач целесообразно использовать метод Монте-Карло, позволяющий применять любые методы анализа исходных данных при интервально-вероятностном задании последних [2, 3]. Он включает в себя генерацию случайных выборок входных переменных (сцепление, угол внутреннего трения, уровень подземных вод и их стандартные отклонения), моделирование поведения массива горных пород в борту карьера при разных ситуациях. Данный подход определения вероятности риска обрушения борта карьера или откоса отвала предлагается в [4–9]. Результаты статистического моделирования указывают на значительные риски вероятного обрушения в локальных областях бортов карьеров. Это вызвано наличием случайных факторов ослабления механических свойств массива: изменением уровня подземных вод, трещиноватости, состава пород, условий эксплуатации карьеров, малым количеством лабораторных и натурных испытаний и др. Подъем уровня грунтовых вод в основании отвала может увеличивать риск его обрушения до 42 % [4]. В [7] показано, как с уменьшением неопределенности в значениях параметров механических свойств снижаются риски обрушения борта карьера.

Цель настоящей работы — определение вероятности деформаций бортов трех действующих карьеров Забайкальского края с существенной неопределенностью механических свойств горных пород, обусловленных тектоникой массива.

Метод Монте-Карло позволяет моделировать случайное поведение входных переменных и рассчитывать вероятность выходных, что может обеспечить более точную оценку риска, когда информация о некоторых данных носит нечеткий (расплывчатый) характер. При этом окончательные результаты в виде вероятностных кривых облегчают работу геотехника на всех этапах обработки данных с целью поиска и оценки наиболее опасных участков борта карьера, склонных к возможному обрушению.

Для применения данного метода исследований необходимы статистические данные изменчивости различных параметров в пределах участка проектируемого карьера: минимальное значение; максимальное значение; среднее значение; среднеквадратическое отклонение; статистический закон распределения параметра. В большинстве случаев такие данные всегда имеются в распоряжении исследователей и проектировщиков.

Большинство современного программного обеспечения, предназначенного для расчета устойчивости бортов и уступов карьера, такие как GEO-SLOPE GeoStudio (Bentley Systems, Incorporated, США) или Slide (Rocscience, Канада), имеют в своем составе метод Монте-Карло. Выбор пакета GEO-SLOPE обусловлен тем, что дает наглядное представление результатов расчета в виде графиков и табличных данных. Алгоритм пакета имеет строгую трехстадийную

методику поиска наиболее слабой поверхности скольжения с возможностью выбора как простых, так и строгих методов расчета. Процедура расчетов предполагает три стадии: равновесие вертикальных сил; равновесие горизонтальных сил; равновесие моментов. В качестве критерия устойчивости бортов использовалось известное соотношение удерживающих и сдвигающих сил, определяемое как коэффициент запаса устойчивости.

При стандартных настройках выполняется расчет для множества центров вращения, анализируется до 400 поверхностей скольжения при 50-кратном приближении (Iterations). При наличии соответствующих данных проводятся расчеты для горных пород, обладающих анизотропией, а также оцениваются статистические риски точности выполненных расчетов с применением метода статистических испытаний Монте-Карло.

Для трех месторождений Забайкальского края, отличающихся сложными горно-геологическими условиями (тектоническая нарушенность пород массивов, зоны разломов, дробления и смятия и др.) и неопределенностью механических свойств пород, выполнены расчеты устойчивости бортов карьеров методом Монте-Карло. Приведем пример использования метода Монте-Карло при оценке параметров карьера на Кирченновском золоторудном месторождении в Забайкалье.

На рис. 1 представлен геологический разрез по одной из разведочных линий с нанесенными контурами предполагаемого карьера. Наиболее крутой участок Юго-Восточного борта карьера с углом 55.66° и высотой 40.79 м залегает в массиве песчаников.

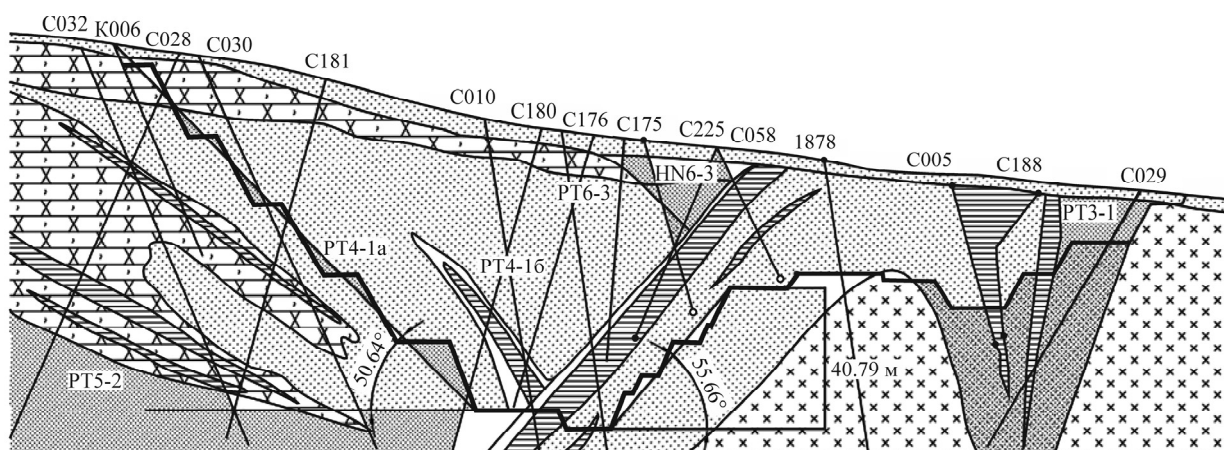


Рис. 1. Геологический разрез по разведочной линии 12 + 00

В табл. 1 приведены физико-механические свойства горных пород, слагающих горный массив.

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические свойства инженерно-геологических элементов (ИГЭ)

ИГЭ	Грунт	Удельный вес грунта, кН/м ³	Угол внутреннего трения, град	Средне-квадратическое отклонение	Удельное сцепление, кПа	Средне-квадратическое отклонение
1	Алевролит, алевропесчаник	2.65	30.46	4.56	12.98	10.41
2	Диорит	2.69	29.20	2.66	15.79	6.72
3	Песчаник	2.68	30.82	3.27	12.29	4.45

Расчет устойчивости данного участка борта карьера по методу ВНИМИ в соответствии с [10] показывает достаточную его устойчивость ($n=1.498$). Как следует из табл. 1, значения сцепления и угла внутреннего трения имеют разброс при их определении в лабораторных условиях. Одна из причин такой вариабельности — известные недостатки лабораторных методов определения параметров механических свойств пород [11–18]. Как один из вариантов перехода от значений параметров механических свойств горных пород, полученных в лабораторных условиях, к значениям в массиве горных пород предлагаются таблицы переходных коэффициентов [19]. Такая неопределенность значений параметров механических свойств пород увеличивает риски развития деформаций бортов карьеров. Отметим и сложность воспроизведения в лабораторных условиях на образцах неоднородности и анизотропии пород в массиве, поэтому для учета неопределенности механических свойств использовался метод Монте-Карло. Результаты расчета приведены на рис. 2. Плотность распределения вероятностей обрушения борта карьера получена на основе расчетов случайного сочетания исходных значений механических свойств горных пород. Установлено, что даже при значительных коэффициентах запаса устойчивости $n=1.50$ и разбросе исходных параметров механических свойств существует 6.7 % вероятность обрушения борта. Это указывает на то, что на устойчивом Юго-Восточном борту карьера при неблагоприятном сочетании механических свойств горных пород можно ожидать локальные обрушения и вывалы.

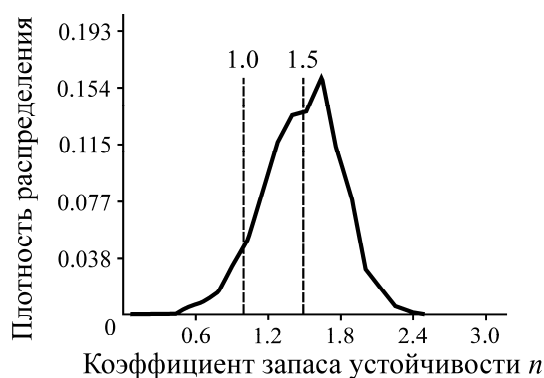


Рис. 2. Результаты моделирования устойчивости участка борта карьера методом Монте-Карло: индекс надежности 1.536; среднеквадратическое отклонение ± 0.316 ; вероятность обрушения откоса 6.7 %

В качестве другого примера использования метода Монте-Карло при оценке устойчивости бортов карьера рассматривался карьер Арчикийского золоторудного месторождения. Объект находится в Чернышевском районе Забайкальского края и расположен в 10 км к северо-востоку от станции Аксеново-Зилово Забайкальской железной дороги.

Для решения вопроса о геомеханической оценке параметров карьера вначале анализировались литературные и фондовые материалы, показавшие, что инженерно-геологические характеристики пород непосредственно на участке месторождения изучены недостаточно. На поисково-оценочной стадии работ выполнен комплекс исследований: гидрогеологическое и инженерно-геологическое обследование территории; выборочная инженерно-геологическая документация геологоразведочных скважин; отбор инженерно-геологических проб и их лабораторные испытания. Сделан вывод о том, что полученные данные могут являться только предвари-

тельными при оценке механических свойств пород и горно-геологических условий разработки месторождения и не являются основой для геомеханического обоснования параметров бортов карьера. В связи с этим проведен отбор проб горных пород в количестве, достаточном для получения достоверных параметров их свойств, необходимых для геомеханических расчетов бортов; определены параметры механических свойств пород; выполнена статистическая обработка результатов лабораторных исследований; предварительно рассчитаны параметры бортов карьера с использованием метода Монте-Карло.

В результате анализа пространственной изменчивости показателей свойств пород, определенных лабораторными методами, с учетом данных о геологическом строении и литологических особенностях грунтов выделены 11 инженерно-геологических элементов. Определение прочностных характеристик пород осуществлялось по всей базе полученных данных. Результаты средних значений характеристик прочности пород приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Средние показатели прочности горных пород

ИГЭ	Порода	N , шт.	σ_c , МПа	$\pm d_c$	σ_p , МПа	$\pm d_p$	φ , град	$\pm d_\varphi$	C	$\pm d_C$
1	Граниты выветрелые	6	118.33	67.71	10.40	7.58	58.54	3,08	17.48	11.40
2	Гранитоиды аргиллитизированные	17	144.76	—	8.52	—	62.41	3.70	17.42	3.01
3	Аплиты в диоритах	6	174.67	29.40	16.70	4.26	56.16	4.72	26.32	4.24
4	Диориты	55	169.12	41.65	14.32	5.83	57.80	5.04	24.31	7.35
5	Метосомотиты	18	144.22	38.48	11.42	3.16	58.42	2.48	20.23	5.21
6	Граниты окварцованные	40	157.41	50.94	12.07	4.89	58.86	4.34	21.56	7.14
7	Граниты лейкократовые измененные	203	172.10	40.46	13.85	5.42	58.67	4.60	24.13	6.99
8	Габро-диориты	8	198.75	20.35	12.55	2.87	61.95	2.70	24.87	3.72
9	Березиты	12	186.50	17.77	12.88	6.13	61.45	5.02	24.13	6.72
10	Гранодиориты	8	166.88	52.48	16.75	5.78	54.90	1.72	26.41	8.64
11	Граниты брекчеевидные	40	191.15	32.19	16.08	5.44	57.95	4.80	27.41	6.25
Средневзвешенное		413	169.87	38.50	13.62	5.10	58.68	4.42	23.77	6.72
Стандартное отклонение $\pm d$		—	23.49	—	2.64	—	2.33	—	3.48	—
Коэффициент вариации, %		—	13.83	—	19.35	—	3.96	—	14.64	—

Примечание. N — количество определений; σ_c , σ_p — предел прочности на сжатие и растяжение; φ — угол внутреннего трения; C — коэффициент сцепления; $\pm d$ — среднеквадратическое отклонение.

Для вычисленных коэффициентов сцепления и углов внутреннего трения, полученных из каждого испытания образцов, построены графики частоты встречи их значений. Кривая частоты коэффициента сцепления имеет вид, близкий к нормальному закону распределения, кривая частоты угла внутреннего трения — также вид, близкий к нормальному закону распределения, при этом есть две вершины, свидетельствующие о наличии всего двух типов горных пород, разделяемых по прочностным характеристикам. По геологическим предпосылкам (скважина 56-12) выделено шесть инженерно-геологических элементов. Аналогичные результаты получены для скважин 60-12 и 65-12. По скважине 55-12 частоты коэффициентов сцепления имели два максимума. В табл. 3 приведены φ и C , соответствующие максимальным частотам.

ТАБЛИЦА 3. Углы внутреннего трения и коэффициенты сцепления, соответствующие максимальным частотам

Скважина	φ_1 , град	φ_2 , град	C_1 , МПа	C_2 , МПа
56-12	57.0	63.0	24.0	—
60-12	56.0	63.0	20.0	—
55-12	59.0	64.0	20.0	32.0
65-12	54.0	60.0	32.0	—
Среднее	56.5	62.5	24.0	32.0

На рис. 3 представлены результаты расчета, выполненные в программе GEO-SLOPE Geo-Studio (Bentley Systems, Incorporated, USA) для Южного борта Арчиковского золоторудного месторождения с использованием метода Монте-Карло.

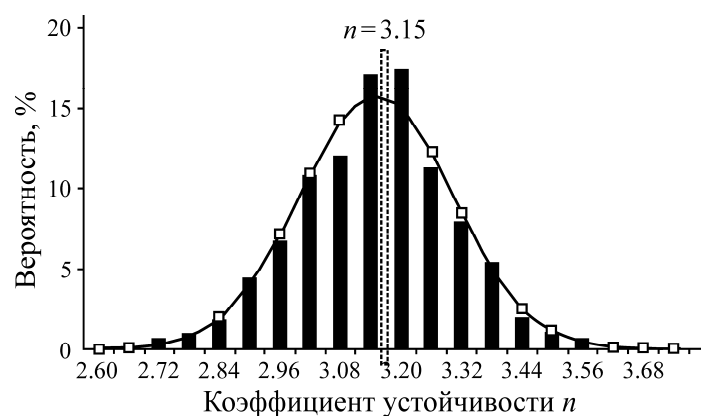


Рис. 3. Результаты вероятностного расчета с применением метода Монте-Карло (средне-квадратические отклонения для $d_\varphi = \pm 4.57^\circ$, $d_C = \pm 150$ кПа; средняя устойчивость уступа $n = 3.15$, минимальная — $n = 2.71$, максимальная — $n = 7.08$)

Вероятность обрушения для Южного борта Арчиковского золоторудного месторождения при заданных параметрах близка к нулю, учитывая даже сочетание неблагоприятных факторов. Об этом свидетельствует и коэффициент устойчивости $n = 3.15$.

Аналогичный расчет выполнен для Юго-Восточного борта Приаргунского буроугольного разреза Кутинского буроугольного месторождения (рис. 4). В соответствии с данными геологических отчетов вмещающие породы на этом месторождении, постоянно перемежаясь между собой и замещая друг друга по падению и простираению, не позволяют отчетливо выделить их на участках между разведочными скважинами. Согласно [20], в расчетах применялось одно значение плотности, сцепления и угла внутреннего трения, вычисленные как средневзвешенные для разновидностей горных пород на участке расчета. При моделировании устойчивости борта разреза использовались средние значения физико-механических свойств горных пород: плотность 1.85 т/м^3 ; сцепление 100.5 ± 15.0 кПа; угол внутреннего трения $16.34 \pm 1.4^\circ$. Результаты расчета приведены на рис. 4. Установлено, что при неблагоприятном сочетании механических свойств горных пород существует вероятность 2.9 %, при которой борт разреза может начать обрушаться.

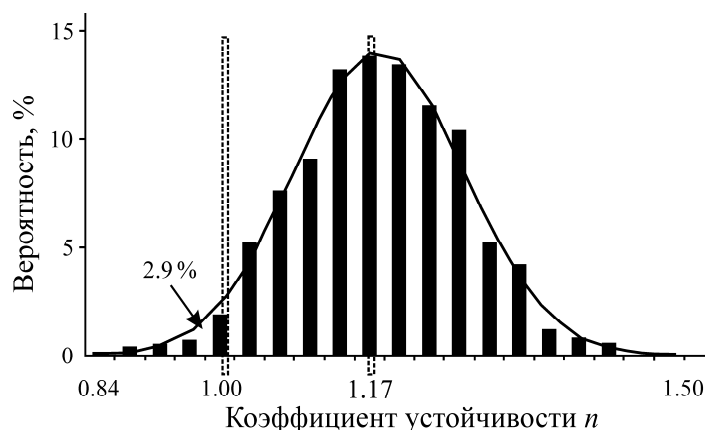


Рис. 4. Результаты вероятностного расчета с применением метода Монте-Карло (среднеквадратические отклонения для $d_\phi = \pm 1.4^\circ$, $d_c = \pm 150$ кПа; устойчивость борта $n = 1.17$)

ВЫВОДЫ

На примере трех месторождений Забайкальского края выявлена существенная неопределенность параметров механических свойств горных пород, связанная со сложностью горно-геологических условий, обусловленных тектонической нарушенностью. Это не позволяет объективно оценить устойчивость бортов карьеров и разреза с использованием традиционных подходов по определению коэффициента запаса устойчивости. Показана необходимость в количественной оценке риска возникновения деформаций бортов карьеров и разреза в условиях неопределенности характеристик прочности пород, что позволяет предусмотреть мероприятия по защите участков, склонных к возможному обрушению. Наиболее целесообразным является вероятностный подход, позволяющий учесть влияние изменчивости факторов на любом этапе отработки карьеров и разреза. Для количественной оценки геориска реализации проектных решений рекомендуется использовать методы статистических испытаний. Это дает возможность скорректировать параметры бортов карьера и разреза как в целом, так и на отдельных его локальных участках с количественной оценкой вероятности их обрушения, а также повысить безопасность ведения горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Методические указания** по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов. — М.: ИПКОН РАН, 2022. — 90 с.
2. **Смолич С. В., Смолич К. С.** Решение горно-геологических задач методом Монте-Карло. — Чита: ЧитГУ, 2004. — 103 с.
3. **Кан К., Фоменко И. К., Ван Ц., Никольская О. В.** Вероятностная оценка устойчивости откоса в скальных грунтах на основе обобщенного критерия прочности Хоека–Брауна // ФТПРПИ. — 2020. — № 5. — С. 60–68.
4. **Ананенко Е. В., Бахаева С. П.** Анализ риска развития деформаций и геомеханический мониторинг для природно-технических систем “отвал – основание” // ГИАБ. — 2023. — № 9. — С. 5–21.
5. **Спирин В. И., Ливинский И. С., Хормазабаль Э.** Оптимизация конструкций бортов карьеров на основе оценки рисков // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2019. — № 3. — С. 317–331.
6. **Contreras L. F.** Quantitative evaluation of economic risk for pit slope design, Newsletter, 2018, Vol. 47. — P. 607–622.

7. Хормазабаль Э. Проектирование конструктивных элементов борта карьера с использованием метода вероятностного анализа ключевых блоков // Горн. журн. — 2015. — № 3. — С. 38–45.
8. Aizhao Zhou, Xianwen Huang, Na Li, Pengming Jiang, and Wei Wang. A Monte Carlo approach to estimate the stability of soil–rock slopes considering the non-uniformity of materials, *Symmetry*, 2020, Vol. 12, No. 4. — 590.
9. Чукин Б. А., Чукин Р. Б. Вероятностная оценка устойчивости бортов карьера в трещиноватых скальных массивах // Горн. журн. — 2019. — № 5. — С. 36–42.
10. Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. Приказ Ростехнадзора от 13.11.2020 № 439. — М.: Ростехнадзор, 2021. — 63 с.
11. Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А., Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Комплексное влияние размеров образца горной породы на величину предела прочности на сжатие // ГИАБ. — 2022. — № 8. — С. 5–13.
12. Султаналиева Р. М., Конушбаева А. Т., Турдубаева Ч. Б. Определение прочностных показателей горных пород при одноосном сжатии и растяжении // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. — 2021. — № 5. — С. 61–66.
13. Ермолович Е. А., Овчинников А. В., Аникеев А. А., Хаустов В. В. Влияние размеров образца на прочность мела // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2020. — № 2. — С. 263–271.
14. Усольцева О. М., Цой П. А., Семенов В. Н. Влияние размера образцов на деформационно-прочностные свойства горных пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2020. — Т. 7. — № 2. — С. 53–59.
15. Kun Du, Xuefeng Li, Rui Su, Ming Tao, Shizhan Lv, Jia Luo, and Jian Zhou. Shape ratio effects on the mechanical characteristics, of rectangular prism rocks and isolated pillars under uniaxial compression, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2022, Vol. 32, No. 1. — P. 347–362.
16. Durmeková I., Bednarik M., Dikejová P., and Adamcova R. Influence of specimen size and shape on the uniaxial compressive strength values of selected Western Carpathians rocks, *Environ. Earth. Sci.*, 2022, Vol. 81, No. 247.
17. André C Zingano. Estimating coal strength based on historical laboratory tests and geomechanics classification, *Aspects Min. Miner. Sci.*, 2020, Vol. 5, No. 4. — 000618.
18. Sefer Beran Celik. The effect of cubic specimen size on uniaxial compressive strength of carbonate rocks from Western Turkey, *Arab. J. Geosci.*, 2017, Vol. 10, No. 19.
19. Труфанов А. Н. Разработка новых таблиц переходных коэффициентов от результатов компрессионных испытаний к нормативному значению модуля деформации // Инж. изыскания. — 2019. — Т. XIII. — № 1. — С. 18–29.
20. Методические указания по определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. — М.: ИПКОН РАН, 2022. — 80 с.

Поступила в редакцию 24/VI 2024

После доработки 14/XII 2024

Принята к публикации 23/I 2025