

УДК 622.271

**ОЦЕНКА УДАРООПАСНОСТИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД
ПРИ ОТРАБОТКЕ ПОДКАРЬЕРНЫХ ЗАПАСОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ САЯК-1**

С. Н. Шапошник¹, Ю. Н. Шапошник², П. А. Цой², А. А. Неверов²

¹*Восточно-Казахстанский технический университет,
ул. Серикбаева, 19, 070010, г. Усть-Каменогорск, Казахстан*

²*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,*

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

Дана оценка удароопасности массива горных пород при отработке подкарьерных запасов месторождения Саяк-1. Месторождение отрабатывается камерно-столбовой системой до глубин 295 м от дна карьера. В настоящее время под дном карьера Центральный Саякского месторождения сосредоточены запасы, большая часть которых представлена рудными целиками. При отработке месторождения отмечены единичные случаи проявления горного давления в динамической форме. В лабораторных условиях определены деформационно-прочностные свойства горных пород. Выявлена склонность образцов керна к удароопасности. Параметры природного поля напряжений на месторождении замерены методом гидроразрыва скважин. Определен показатель интенсивности трещиноватости массива горных пород RQD. Установлено, что массив месторождения относится к крепким и среднетрещиноватым. Среднее значение предела прочности пород на одноосное сжатие составляет 95.85 МПа. По критерию Кайзера потенциал удароопасности у пород месторождения отсутствует, вследствие чего возможность динамических разрушений маловероятна. Показано, что для всех типов пород месторождения, склонных к горным ударам, на глубине до 295 м значения коэффициента K , характеризующего удароопасность массива, меньше критического. Уровень максимальных напряжений, действующих вблизи горных выработок месторождения и обусловленных отработкой запасов руд, не достаточен для провоцирования динамических проявлений горного давления.

Массив горных пород, деформационно-прочностные свойства, напряжения, удароопасность

DOI: 10.15372/FTPRPI20250104

EDN: KINREA

Месторождение Саяк-1 входит в Саякскую группу месторождений, которые находятся в восточном Прибалхашье, расположенном на территории Карагандинской области Республики Казахстан. Абсолютные высотные отметки поверхности месторождения варьируют в пределах от 500 до 575 м. Руды месторождения комплексные. Основное промышленное значение имеет медь. На месторождении выделяются 32 рудных тела. Длина их по простиранию колеблется в пределах 320–1600 м, ширина вкрест простирания составляет 200–600 м, по падению 520 м и по мощности от 3–15 до 40–60 м. Рудные тела в пределах горизонтов залегают в основном кулисообразно.

В настоящее время под дном карьера Саяк-1 Саякского месторождения сосредоточены запасы, оставленные в различного рода целиках. По прогнозным оценкам эти запасы оцениваются в 9701.0 тыс. т. Горные работы ниже дна карьера ведутся до отм. 70 м (глубина 295 м от дна карьера) (рис. 1).

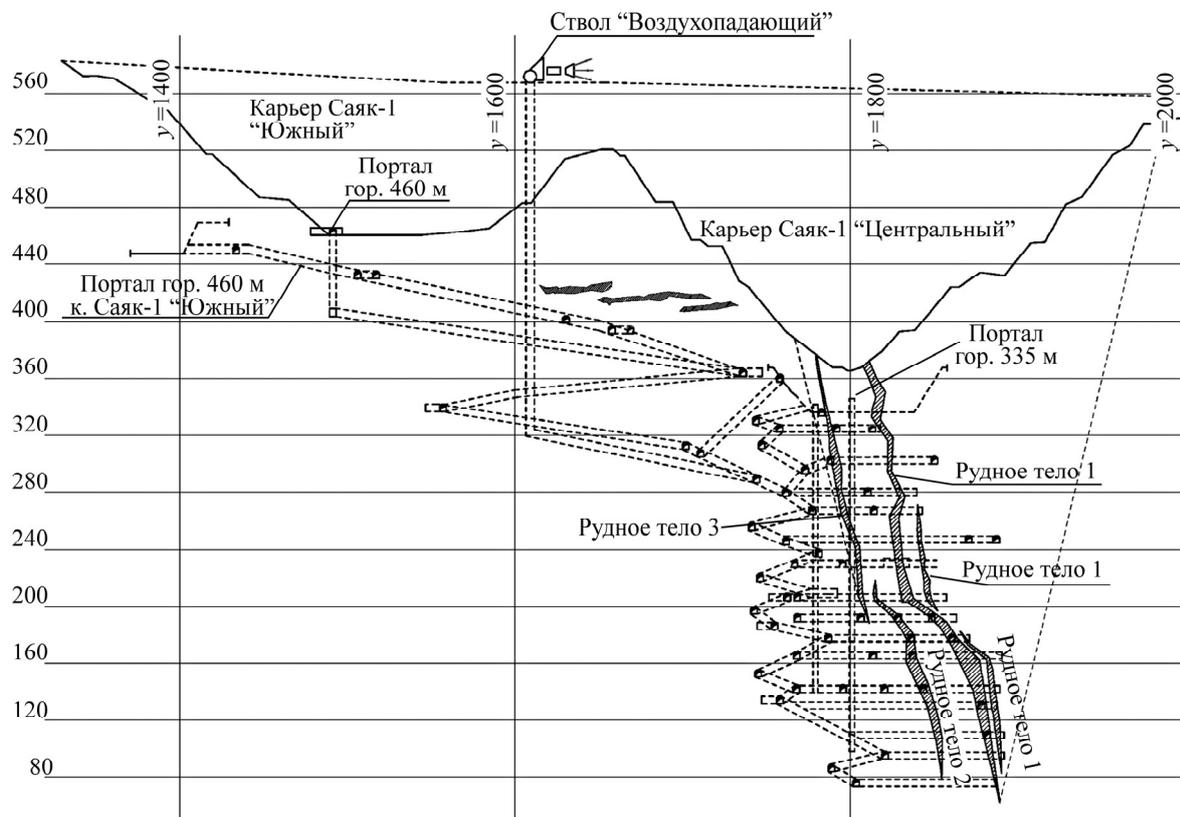


Рис. 1. Вертикальная схема вскрытия месторождения Саяк-1

Выемка вертикальных сближенных рудных тел 1–3 месторождения Саяк-1 под дном карьера осуществляется камерно-столбовой системой с отработкой горизонтальных камер по простирацию рудных тел и оставлением горизонтальных рудных целиков между подэтажами. Междуканнерные целики (МКЦ) по падению рудных тел не оставляются. Именно рудопородные целики обеспечивают основную устойчивость подработанных бортов карьера. Между очистными камерами бессистемно оставляют столбчатые МКЦ. Их соосность на разных отметках не соблюдается, расположение приближено к хаотичному распределению. Предохранительный целик между карьером и шахтой, предусмотренный проектом, частично отработан. Созданная многоярусная конструкция из очистных камер, по вертикали разделенных рудными целиками и поддерживаемыми несоосными столбчатыми целиками, является малонадежной горнотехнической конструкцией. В настоящее время рудник дорабатывает балансовые запасы крутопадающих рудных тел в южной (наиболее глубокой) части шахтного поля на глубине до 295 м от дна карьера Центральный. Дальнейшая перспектива горных работ под дном карьера связана только с повторной разработкой руды, оставленной в рудных вертикальных столбчатых МКЦ.

При отработке месторождения отмечены единичные случаи проявления горного давления в динамической форме: стреляние, трески в массиве, вывалы пород в кровле выработок. На основании изложенного следует, что проведение геомеханических исследований сложившейся горнотехнической ситуации под дном карьера Центрального месторождения Саяк-1, в частности оценка удароопасности массива горных пород, является актуальной задачей.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

В лабораторных условиях определены деформационно-прочностные свойства горных пород месторождения Саяк-1 (табл. 1), в том числе модули упругости и спада, общая и упругая деформации. При оценке удароопасности горных пород учитывались следующие коэффициенты:

$$K_1 = \frac{E}{M}, \quad K_2 = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_{\text{общ}}},$$

где E — модуль упругости; M — модуль спада; ε_y и $\varepsilon_{\text{общ}}$ — продольные упругая и полная деформации, возникающие при одноосном сжатии пород в натуральных или лабораторных условиях.

ТАБЛИЦА 1. Деформационно-прочностные свойства горных пород месторождения Саяк-1

Порода	Предел прочности, МПа		E , ГПа	M , ГПа	$\varepsilon_y \cdot 10^{-3}$	$\varepsilon_{\text{общ}} \cdot 10^{-3}$	K_1	K_2	Заключение об удароопасности образца
	при сжатии	при растяжении							
Туфопесчаники-туфоалевролиты	67.2	12.2	15.48	14.67	438	959	1.05	0.45	Неудароопасный
Песчаник	92.5	16.1	59.46	73.84	158	417	0.80	0.37	Удароопасный
Туфоалевролиты	109.0	18.8	24.10	29.35	462	1122	0.82	0.41	>>
Скарн	92.5	17.9	52.32	46.53	234	681	1.12	0.34	Неудароопасный
Песчаник мраморизованный	33.6	6.6	7.31	5.06	461	1252	1.44	0.36	>>
Дайка порфировая	115.2	19.4	30.59	33.61	388	1103	0.91	0.35	Удароопасный
Дайка зернистая	168.9	18.3	68.19	81.69	288	828	0.83	0.34	>>
Песчаник	163.4	18.6	54.56	71.08	302	898	0.76	0.33	>>
Диорит серый	125.1	19.2	32.39	21.89	404	1073	1.47	0.37	Неудароопасный
Мрамор	83.1	17.8	28.88	11.73	287	1043	2.46	0.27	>>
Туфы	87.0	25.1	29.53	35.39	294	930	0.83	0.31	Удароопасный
Магнетитовая руда	72.7	13.4	42.92	49.08	189	522	0.87	0.36	>>
Медная руда	61.3	21.7	18.65	9.84	358	1223	1.89	0.29	Неудароопасный
Гранаты в скарне	70.5	11.0	36.50	17.25	195	626	2.11	0.31	>>

При $K_1 < 1$ порода считается удароопасной, при $K_1 > 1$ — неудароопасной, при $K_2 > 0.7$ — удароопасной, при $K_2 < 0.7$ — неудароопасной. Если хотя бы один коэффициент подтверждает удароопасность горной породы, то выносится заключение об ее удароопасности. Испытания для каждой разновидности породы проводились на пяти образцах (в табл. 1 приведены усредненные значения). По данным лабораторных испытаний образцы песчаника, туфоалевролитов, дайки порфировой, дайки зернистой, туфов, магнетитовой руды, отобранные на глубинах до отм. 70 м, отнесены к удароопасным.

ШАХТНЫЕ ЗАМЕРЫ

Параметры природного поля напряжений на месторождении измерены в 2022 г. методом гидроразрыва скважин. На основе выполненных натурных экспериментов установлены компоненты тензора напряжений природного напряженного состояния массива: максимальные тектонические напряжения $\sigma_1 = 1.7 \mathcal{H}$ действуют горизонтально по простиранию рудной зоны с азимутом $153 - 333^\circ$; минимальные горизонтальные напряжения вкрест простирания рудной зоны составляют $\sigma_3 = 0.67 \mathcal{H}$; гравитационное давление веса налегающей толщи пород является промежуточным напряжением $\sigma_2 = \mathcal{H}$. Оценка потенциальной возможности проявления в условиях месторождения Саяк-1 горного давления в динамических формах и необходимости отнесения месторождения к опасным по горным ударам проведена в соответствии с требованиями [1].

Основные оцениваемые факторы, определяющие потенциальную возможность возникновения удароопасных ситуаций [2–9]:

- способность массива горных пород к упругому деформированию и накоплению потенциальной энергии упругих деформаций;
- склонность руд (пород) к хрупкому разрушению;
- уровень действующих вблизи горных выработок напряжений, близких к пределу прочности горных пород и достаточный для провоцирования горного удара.

Метод дискования керна при оценке удароопасности горных пород является базовым [10]. На основании изучения керна месторождения Саяк-1 при бурении геологоразведочных скважин установлено отсутствие эффекта его дискования. Кроме того, дана оценка склонности образцов керна к удароопасности с учетом лабораторных испытаний на основе запредельного деформирования.

Оценка структурной нарушенности по методике Дира (показатель качества пород RQD) определяется посредством изучения керна породы, извлекаемого из скважины [11].

Съемка трещиноватости массива в горных выработках рудника Саяк-1 выполнена инструментально горным компасом. Расчет значений RQD выполняется по формуле Хадсона [12]:

$$RQD = 100(0.1FF + 1)\exp(-0.1FF).$$

Показатель частоты разрушения/трещиноватости FF определяется числом трещин, приходящихся на один линейный метр, взятый вдоль линии опробования (для условий месторождения Саяк-1 $FF = 6.7$).

Выявлено, что показатель интенсивности трещиноватости массива RQD имеет экспоненциальное распределение со значением медианы RQD 86.3 % (т. е. 50 % всех значений находится в пределах RQD 80 – 100 %). По показателю RQD массив руд и пород относится к устойчивым.

На основании проведенных в шахте замеров трещиноватости массива горных пород установлены сводные элементы залегания систем трещин на месторождении (табл. 2, рис. 2). Кинематический анализ подземных клиньев, определенных пересекающимися структурными несплошностями в горном массиве, окружающем подземную выработку, выполнен с использованием средних ориентаций систем трещин в программе Unwedge для двух направлений горной выработки (63° и 153°). Данные направления являются направлениями перпендикулярными и параллельными простиранию рудного тела и представляют две основные ориентации для подготовительных горных выработок (рис. 3).

ТАБЛИЦА 2. Сводные элементы залегания выявленных систем трещин для месторождения Саяк-1, град

Номер трещины	Система трещин	Угол падения	Азимут падения
1	Основные	86	312
2		80	263
3		26	236
4	Дополнительные	68	115
5		73	148

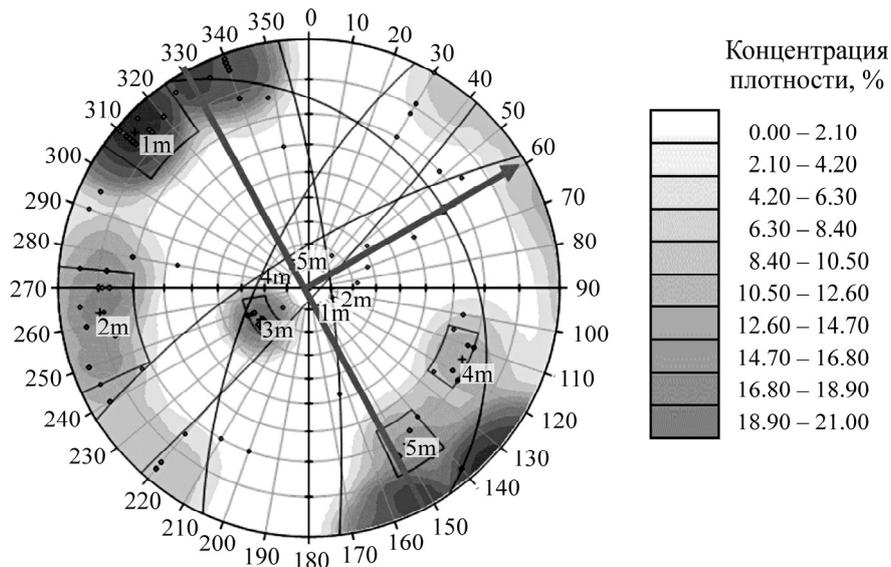


Рис. 2. Сводная полярная диаграмма трещиноватости массива горных пород под карьером Центральным

Кинематический анализ показал наличие потенциальных тетраэдрических клиньев, которые могут образовываться в кровле, подошве и боковых бортах (клинья с коэффициентом запаса устойчивости FS ниже 1.0) (рис. 3).

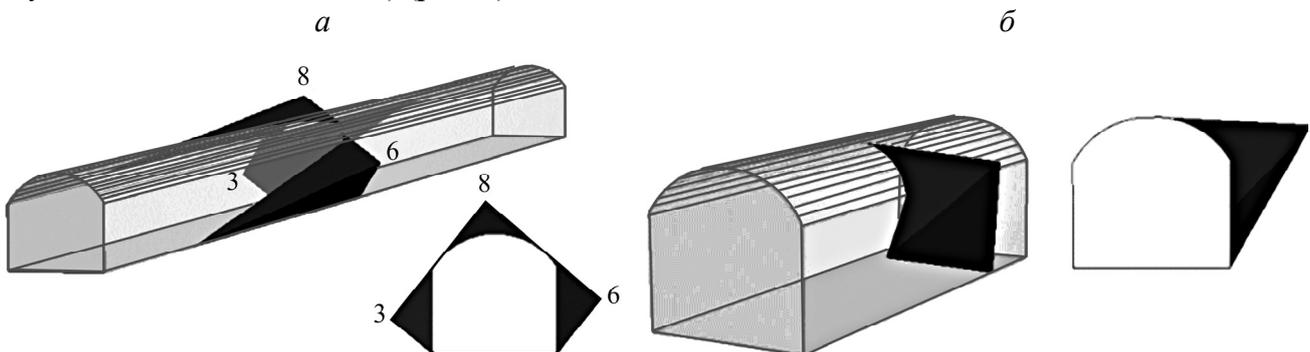


Рис. 3. Конфигурация и параметры вывалов при проходке горных выработок: *а* — направление горной выработки 63°: система трещин 3: FS=0.858; объем 36.426 м³; масса 96.5295 т; высота вершины 2.58 м; опорное давление 0.092 т/м²; система трещин 6: FS=0.451; объем 44.841 м³; масса 118.829 т; высота вершины 1.73 м; опорное давление 0.614 т/м²; система трещин 8: FS=0.000; объем 20.343 м³; масса 53.91 т; высота вершины 1.29 м; опорное давление 0.883 т/м²; *б* — направление горной выработки 153°: система трещин 4: FS=0.451; объем 11.962 м³; масса 31.699 т; высота вершины 2.84 м; опорное давление 0.943 т/м²

Известно, что трещиноватость приводит к существенному снижению как прочностных, так и упругих свойств массива горных пород. Полученные в ходе лабораторных исследований физико-механические свойства пород не отражают в полной мере механическое поведение всего породного массива. Прочностные свойства горных пород и руд в массиве, характеризующие их склонность к накоплению потенциальной энергии и хрупкому разрушению, рассчитываются с учетом показателей трещиноватости и блочности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что для условий месторождения Саяк-1 по показателям FF и RQD породы относятся к крепким и среднетрещиноватым, т. е. коэффициент структурного ослабления можно принять $K_{co} = 0.35$. Среднее значение предела прочности пород на одноосное сжатие для подкарьерных запасов месторождения составляет 95.85 МПа. При расчетах необходимо учитывать коэффициент длительной прочности, принимаемый по результатам испытаний горных пород, обладающих существенной ползучестью [13], в расчетах принято $k_d = 0.9$.

Горные удары в основном происходят в очень слаботрещиноватых породах, реже в слаботрещиноватых породах — монолитных массивах (при показателе нарушенности массива RQD 80–100 %) [5, 14]. Массив горных пород месторождения относится к среднетрещиноватым, что свидетельствует о низкой вероятности горных ударов.

Гравитационное давление от массы налегающей толщи для литологических разностей пород $\sigma_2 = \mathcal{H}$ на глубине горных работ 295 м составляет:

- для песчаника плотностью 2708 кг/м³ при естественной влажности — 7.98 МПа;
- для скарна плотностью 3423 кг/м³ — 10.09 МПа.

Действующее в массиве на глубине 295 м от дна карьера Центральное максимальное горизонтальное напряжение при вертикальной составляющей 10.09 МПа и коэффициенте бокового давления в массиве $\lambda = 1.7$ составит 17.15 МПа.

По [15], если в природном массиве действуют горизонтальные тектонические напряжения, превышающие вертикальное давление \mathcal{H} , то $\lambda > 1$. В этом случае максимальные напряжения будут наблюдаться в кровле и почве выработки: $\max \sigma = \mathcal{H}(3\lambda - 1)$, в рассматриваемом случае $\max \sigma = 20.56$ МПа.

Факт разрушения выработки означает, что действующие на ее контуре максимальные напряжения достигли или превысили предел прочности массива на сжатие σ_m с учетом коэффициента структурного ослабления K_{co} и коэффициента длительной прочности k_d , $\max \sigma \geq \sigma_m$. Однако в рассматриваемом случае $\max \sigma < \sigma_m$ ($20.56 \text{ МПа} < 95.85 \cdot 0.35 \cdot 0.9 = 30.19$). Это свидетельствует о том, что действующие на контуре выработки максимальные напряжения на глубинах до 295 м не превышают предел прочности пород на одноосное сжатие.

На основании лабораторных испытаний прочности некоторые типы пород характеризуются относительно низкими значениями предела прочности на одноосное сжатие, МПа: песчаник мраморизованный — 33.6; медная руда — 61.3; туфопесчаники-туфоалевролиты — 67.2.

Отношения действующих в массиве напряжений к пределу прочности пород на сжатие в массиве для слабых пород и руд свидетельствуют о возможных разрушениях в кровле выработок в виде шатрового свода:

- песчаников мраморизованных — $20.56 > 33.6 \cdot 0.35 \cdot 0.9 = 10.58$ МПа;
- медной руды — $20.56 > 61.3 \cdot 0.35 \cdot 0.9 = 19.31$ МПа.

Следует отметить, что в дальнейшем при возможном понижении уровня горных работ за счет увеличения максимальных напряжений в массиве полученные зависимости могут не соблюдаться.

Возможность проявления горных ударов для пород, склонных к горным ударам, характеризуется соответствующим уровнем напряженного состояния массива:

— категория “опасно” — $\sigma_m / [\sigma] \geq 0.8$;

— категория “неопасно” — $\sigma_m / [\sigma] < 0.8$,

где σ_m — действующее в массиве напряжение; $[\sigma]$ — предел прочности породы (руды) при сжатии.

Для условий рудника Саяк-1 на глубинах горных работ от дна карьера до уровня 295 м, согласно приведенным зависимостям, уровень напряженного состояния массива для всех литологических разностей составит: $K = \sigma_m / [\sigma] = 17.15 / 95.85 \cdot 0.35 \cdot 0.9 = 0.56 < 0.8$, т. е. уровень напряженного состояния массива относится к категории “неопасно”.

На нижних горизонтах рудника породы находятся в объемном сжатии, что повышает значения предела прочности пород при объемном сжатии и благоприятно сказывается на геомеханической ситуации при отработке рудных залежей.

В табл. 3 представлены результаты исследования удароопасности массива месторождения Саяк-1 по критерию $K = \sigma^{\max} / \sigma_m$, характеризующего удароопасность массива, при этом учтены прочностные свойства пород и полученные значения зависимости максимальных напряжений на глубине отработки 295 м.

ТАБЛИЦА 3. Результаты исследования удароопасности месторождения Саяк-1 на глубинах отработки 295 м от дна карьера при $K_{co} = 0.35$ и $k_d = 0.9$

Порода	Степень удароопасности пород	K	Степень удароопасности месторождения
Песчаник	Удароопасная	0.58	Неудароопасная
Туфоалевролиты		0.49	
Дайка порфировая		0.47	
Дайка зернистая		0.32	
Песчаник		0.33	
Туфы		0.62	
Магнетитовая руда		0.74	

Для всех типов пород месторождения, склонных к горным ударам, и на глубине отработки горизонта до 295 м значения коэффициента K , характеризующего удароопасность массива, находятся в интервале 0.32–0.74, т. е. меньше критического значения, равного 0.8. Это означает, что уровень максимальных напряжений, действующих вблизи горных выработок месторождения и обусловленных отработкой запасов на глубинах до 295 м камерно-столбовой системой, не достаточен для провоцирования динамических проявлений горного давления, в том числе горных ударов. Таким образом, массив горных пород месторождения Саяк-1 может быть отнесен к неопасным по горным ударам.

Оценка потенциала удароопасности горных пород выполнена также с использованием критерия Кайзера, который описывает взаимосвязь между значениями прочности пород и их коэффициентом хрупкости в виде диаграммы на рис. 4 [16–19].

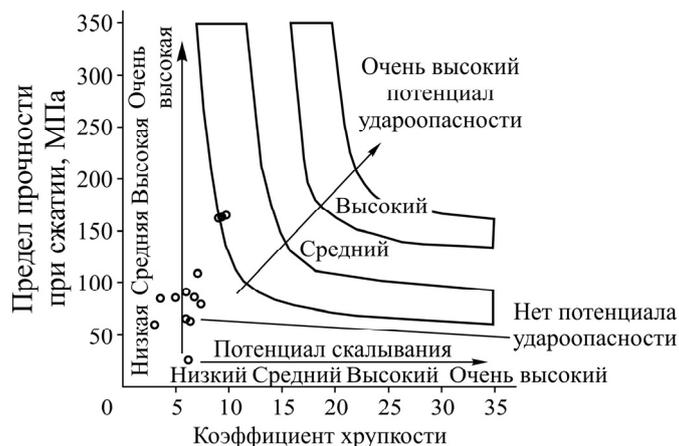


Рис. 4. Диаграмма для оценки потенциала удароопасности пород по критерию Кайзера

По критерию Кайзера потенциал удароопасности у пород отсутствует (значения расположены ниже уровня “низкий потенциал удароопасности” на диаграмме), вследствие чего возможность динамических разрушений маловероятна.

ВЫВОДЫ

Оценка структурной нарушенности вмещающего массива и рудопроявления месторождения Саяк-1 с помощью индекса качества пород RQD позволила классифицировать горный массив как среднетрещиноватый, в котором динамические проявления горного давления не отмечаются и не прогнозируются в пределах проектируемых глубин отработки.

Уровень максимальных напряжений, действующих вблизи горных выработок месторождения и обусловленных отработкой запасов на глубинах до 295 м камерно-столбовой системой, не достаточен для провоцирования динамических проявлений горного давления, в том числе горных ударов во всех типах пород месторождения, склонных к горным ударам.

Результаты проведенных исследований показали отсутствие удароопасности на месторождении Саяк-1 на глубинах отработки до 295 м от дна карьера Центральный. Проявления горного давления в динамических формах не прогнозируются. Массив горных пород месторождения Саяк-1 до глубины 295 м от дна карьера при соблюдении принятой в проекте технологии отработки камерно-столбовой системой разработки может быть отнесен к неопасным по горным ударам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** обеспечения промышленной безопасности для опасных производственных объектов, ведущих горные и геологоразведочные работы. Приказ Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 30 декабря 2014 года № 352. Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 13 февраля 2015 года № 10247.
2. **Методические указания** по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам / А. Н. Шабаров, А. А. Филинков, В. В. Зубков и др. — СПб: СПбГИ, 2011. — 49 с.
3. **Козырев А. А., Кузнецов Н. Н., Макаров А. Б.** О критериях удароопасности горных пород // Горн. пром-сть. — 2023. — №1. — С. 61–68.
4. **Долгонос В. Н., Старостина О. В., Низаметдинов Ф. К.** Управление состоянием горного массива. — Караганда: КарГТУ, 2015. — 196 с.

5. **Айнбиндер И. И., Овчаренко О. В., Пацкевич П. Г.** Исследование удароопасности массива горных пород месторождения “Купол”, обрабатываемого подземным способом // ГИАБ. — 2018. — № 9. — С. 118–127.
6. **Филиппов В. Н., Еременко А. А., Христолюбов Е. А.** Отработка предохранительных целиков в удароопасных условиях на Таштагольском и Шерегешевском месторождениях // ФТПРПИ. — 2021. — № 1. — С. 62–72.
7. **Овчаренко О. В., Айнбиндер И. И., Пацкевич П. Г.** Исследование удароопасности массива горных пород месторождения “Морошка”, обрабатываемого системой разработки с закладкой выработанного пространства // ГИАБ. — 2018. — № 8. — С. 5–15.
8. **Еременко А. А., Мулев С. Н., Штирц В. А.** Мониторинг геодинамических явлений микросейсмическим методом при освоении удароопасных месторождений // ФТПРПИ. — 2022. — № 1. — С. 12–22.
9. **Шапошник Ю. Н., Конурин А. И., Портола В. А., Елгазинов Д. С.** Оценка удароопасности массива горных пород Стрежанского месторождения // Безопасность труда в пром-сти. — 2024. — № 10. — С. 64–70.
10. **Методические указания** по прогнозу степени удароопасности участков массива горных пород, руд и угля по разделению керна на диски и выходу буровой мелочи. — Л., 1985. — 24 с.
11. **Протосеня А. Г., Тимофеев О. В.** Геомеханика: Учеб. пособие // СПбГГИ. — 2008. — 117 с.
12. **Онуприенко В. С., Еременко А. А., Шапошник Ю. Н., Копытов А. И.** Выбор типов и параметров крепей в условиях подземной отработки апатит-нефелиновых месторождений // Вестн. КузГТУ. — 2023. — № 2 (156). — С. 56–70.
13. **ГОСТ 26447-85.** Породы горные. Метод определения механических свойств глинистых пород при одноосном сжатии.
14. **Нескромных В. В., Неверов А. Л., Рожков В. П., Каратаев Д. Д., Неверов А. А.** Анализ горно-геологических условий бурения глубоких скважин на Талнахском рудном узле // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. — 2015. — Т. 326. — №1. — С. 100–110.
15. **Макаров А. Б.** Практическая геомеханика. — М.: Горн. кн., 2006. — 391 с.
16. **Цой П. А., Усольцева О. М.** Модификация критерия хрупкости с учетом модулей упругости и спада (по Тарасову) в терминах угловых коэффициентов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — Т. 6. — № 2. — С. 283–286.
17. **Taheri A. and Munoz H.** New Brittleness indices to describe rock failure under compressive load, Proc. of the 2nd Int. Conf. on Rock Dynamics and Applications, 2016. — P. 489–494.
18. **Tarasov B. and Potvin Y.** Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 2013, Vol. 59. — P. 57–69.
19. **Gong F. Q., Wang Y. L., and Luo S.** Rockburst proneness criteria for rock materials: Review and new insights, J. Central South University, 2020, Vol. 27. — P. 2793–2821.

Поступила в редакцию 15/VI 2024

После доработки 20/XII 2024

Принята к публикации 23/I 2025