

УДК 622.281

**ВЫБОР КРЕПИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК
ПРИ РАЗРАБОТКЕ УДАРООПАСНЫХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГОРНОЙ ШОРИИ**

А. И. Копытов¹, А. А. Еременко^{1,2}, Ю. Н. Шапошник²

¹Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,
ул. Весенняя, 28, 650000, г. Кемерово, Россия

²Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Рассмотрено влияние трещиноватости на устойчивость приконтурного массива с помощью коэффициента структурного ослабления и среднего расстояния между трещинами. Приведены параметры гравитационно-тектонического поля напряжений на месторождениях Горной Шории, в том числе азимут главной горизонтальной составляющей напряжения. Обсуждаются результаты лабораторных испытаний комбинированных крепей на временное сопротивление и материала стержня анкеров на относительное удлинение. Изложены методические основы создания многофакторной цифровой модели для выбора эффективного и безопасного вида крепления горных выработок при разработке железорудных месторождений Горной Шории на основе оценки устойчивости приконтурного массива в зависимости от его трещиноватости и напряженного состояния.

Крепёжь, горные выработки, приконтурный массив, устойчивость, трещиноватость, предел прочности, напряжённое состояние, категория удароопасности

DOI: 10.15372/FTPRI20200408

Горную Шорию представляют железорудные месторождения Темир-Тельбесской (Казское) и Кондомской групп. Наиболее перспективны месторождения Кондомской группы: Таштагольское и Шерегешевское [1]. На Таштагольском месторождении очистные работы достигли глубины 700 м, горно-капитальные — 900 м и ведутся на пяти горизонтах $-70 \div (-350)$ м, проходческие работы — на шести горизонтах шахты. В течение года проводится свыше 1000 м горно-капитальных, более 2000 м подготовительных и 3000 м нарезных выработок, добывается 2.5–3.0 млн т руды. На Шерегешевском месторождении горные работы выполняются на шести горизонтах шахты $+525 \div (+115)$ м. Очистные работы проходят на глубине 470 м, горно-капитальные — 600 м. В течение года на месторождении осуществляется более 2000 м подготовительных и 12500 м нарезных выработок, добывается до 4.6 млн т руды [2]. Таштагольское и Шерегешевское месторождения отнесены к опасным по горным ударам [3, 4]. Исследованиями ВостНИГРИ установлено, что максимальные главные напряжения на указанных месторождениях имеют северо-западное направление и в 2.5–3.0 раза превышают вес столба нале-

гающих пород γH . В течение года на рудниках проводится 3–4 массовых взрыва с сейсмической энергией $10^8 - 10^9$ Дж [5]. В данных условиях выбор эффективного вида крепления горных выработок с учетом последующей эксплуатации обеспечивает требуемую безопасность разработки железорудных месторождений Горной Шории [6, 7].

РАЗРАБОТКА МНОГОФАКТОРНОЙ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ОБОСНОВАНИЯ И РАСЧЕТА КРЕПИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Многолетняя практика показывает, что основными параметрами, влияющими на выбор крепи, являются: устойчивость породного и рудного массивов, коэффициент крепости по шкале Протодяконова f , коэффициент структурного ослабления K_{co} , среднее расстояние между трещинами L_{cp} , размер зоны неупругих деформаций законтурного массива l_b . Устойчивость горных пород и руд определяется прочностными характеристиками литологических разностей, интенсивностью трещиноватости и первоначальным напряженным состоянием горного массива [8]. Исходные параметры устанавливаются геологической службой. Выявляются основные изменения трещиноватости пород и руд, распространение систем трещин, приуроченность к конкретным литологическим разностям. Степень устойчивости массива в районах ослаблений дизъюнктивного типа обусловлена зонами дробления, смятия и рассланцевания. Особенно опасны из-за неустойчивости зоны разломов со слабой цементацией: глинистый материал, карбонаты, гидроксиды железа, хлорит. При документировании геологической службой выделяются участки ослабления пород, связанные с активно проявившимися метасоматическими процессами и низкотемпературным гидротермальным метаморфизмом: карбонатизацией, хлоритизацией, серитизацией, гематитизацией и развитием гидроксидов железа. Окварцевание не снижает устойчивость горных пород.

Устойчивость приконтурного массива зависит от трещиноватости пород и руд. К основным типам сетей трещин относятся непрерывные, прерывные и хаотичные. Учитываются только трещины, разбивающие массив на блоки размером от десяти сантиметров до нескольких метров. Микротрещины в пределах блока можно не учитывать. Для оценки трещиноватости следует определять параметры основных систем трещин: ширину, тип заполнения (при наличии), угол падения [9]. По виду заполнителя трещины делятся на три типа:

- закрытые и спаянные трещины, трещины с кварцевым и кварц-карбонатным заполнителем;
- трещины с заполнителем, представляющим собой продукты низкотемпературного гидротермального динамометаморфизма: хлоритом, серицитом, карбонатом, гематитом, гидроксидами железа;
- трещины в зонах разломов с тектонической глиной трения, трещины в зонах дробления со слабой цементацией (глинистый материал, особенно обводненный) и трещины в зонах смятия и интенсивного рассланцевания с милонитизацией и зеркалами скольжения.

Влияние трещиноватости на устойчивость приконтурного массива учитывается при помощи коэффициента структурного ослабления K_{co} и среднего расстояния между трещинами L_{cp} . По всему шахтному полю месторождений Горной Шории фиксируется несколько систем трещин (не менее 2–3). Количество систем трещин определяется в забое на трех различных участках по горизонтали и вертикали на отрезках длиной 2–3 м в зависимости от сечения выработки. Среднее расстояние между трещинами находится по формуле

$$L_{cp} = \frac{1}{6} \left(\frac{L_1^r}{n_1^r} + \frac{L_2^r}{n_2^r} + \frac{L_3^r}{n_3^r} + \frac{L_1^b}{n_1^b} + \frac{L_2^b}{n_2^b} + \frac{L_3^b}{n_3^b} \right),$$

где L_1^r и L_1^b — расстояния между крайними трещинами на горизонтальном и вертикальном отрезках, м; n_1^r и n_1^b — количество трещин на этих отрезках.

Среднее расстояние между трещинами принимается по наиболее интенсивной трещиноватости. Замеры трещиноватости проводятся для всех литологических разностей пород и руды с расстоянием между участками не более 30 – 40 м по простиранию. В различных структурных блоках выполняются дополнительные измерения. Результаты замеров заносятся в журнал по следующей форме:

Привязка участка	Характеристика пород, руд	Результат замеров											
		L_1^r	n_1^r	L_2^r	n_2^r	L_3^r	n_3^r	L_1^b	n_1^b	L_2^b	n_2^b	L_3^b	n_3^b

Руды и породы Шерегешевского месторождения по интенсивности трещиноватости характеризуются параметрами, представленными ниже:

	L_{cp} , м
Интенсивная трещиноватость	До 0.1
Высокая трещиноватость	0.10–0.20
Средняя трещиноватость	0.20–0.50
Трещиноватость ниже средней, в основном закрытые трещины	0.50–0.60
Слаборазвитая трещиноватость, редкие закрытые трещины или их отсутствие	> 0.60

Переход рудников Горной Шории к разработке рудных тел на больших глубинах и отнесение частей месторождений к склонным и опасным по горным ударам обусловили необходимость решения новых задач по условиям применения различных типов и видов крепей [10 – 12]. При проектировании, строительстве и эксплуатации шахт на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам, рекомендуется применять: податливые крепи; крепи поддерживающего, распорного или ограждающего типа; комбинированные крепи; штанговые крепи с элементами податливости. При выборе типа крепи в условиях проявления горного давления в динамической форме предпочтительны крепи, взаимодействующие с приконтурным массивом, и комбинированные крепи [13 – 16].

В последние годы на зарубежных и отечественных рудниках для выбора типа, параметров крепей и технологии возведения широко используется рейтинговая классификация массива горных пород Норвежского геотехнического института (Q -рейтинг Н. Р. Бартона) [17 – 20]. На основе рейтинговых оценок свойств и качества трещиноватого массива в качестве комбинированных крепей (анкера с сеткой или армокаркасами и торкрет-бетоном) в весьма неустойчивых и удароопасных породах на Шерегешском руднике рекомендованы конструкции усиленной комбинированной крепи с фрикционными анкерами. Анкеры ТФА, СЗА и АТФ (АФ) применяются в качестве фрикционных.

Для материала стержня анкеров СЗА в лабораторных условиях одноосным растяжением определено временное сопротивление σ_v , которое составило 437.12–439.73 МПа, что соответствует требованиям ГОСТ 31559–2012 [21, 22]. Также установлено значение деформации удлинения. Результаты испытаний представлено в табл. 1 и на рис. 1.

ТАБЛИЦА 1. Результаты испытаний

Номер образца	Максимальное усилие, Н	Максимальное напряжение, МПа	Удлинение, % (деформация)
1	19050.0	439.726	35.935
2	21750.0	437.121	32.8064

Установлено, что временное удлинение материала анкера СЗА составило 32.8–35.9%. Анкерная фрикционная крепь с элементами податливости соответствует условиям применения для рудников, склонных и опасных по горным ударам [23, 24].

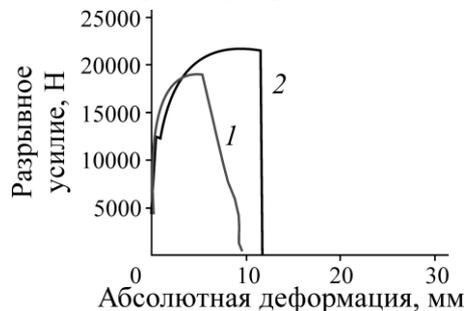


Рис. 1. Зависимость разрывного усилия в материале СЗА от абсолютной деформации

На месторождениях различают выработки, находящиеся вне и в зоне влияния очистных работ. В зависимости от расположения выработок относительно направления действия главных составляющих поля напряжений различается устойчивость выработок. Исходное напряженное состояние массива горных пород характеризуется вертикальными и горизонтальными напряжениями по простиранию и вкрест простирания рудной залежи.

Месторождения Горной Шории характеризуются гравитационно-тектоническими полями напряжений, в которых значения горизонтальных составляющих больше вертикальных (табл. 2). Каждому месторождению свойствен свой азимут главной горизонтальной составляющей напряжения $A_{\sigma_{max}}$.

ТАБЛИЦА 2. Параметры гравитационно-тектонического поля напряжений на месторождениях Горной Шории

Месторождение	Вне зоны влияния очистных работ				В зоне влияния очистных работ			
	σ_1	$\sigma_2 = \sigma_{max}$	σ_3	$A_{\sigma_{max}}$, град	σ_1	$\sigma_2 = \sigma_{max}$	σ_3	$A_{\sigma_{max}}$, град
Казское	0.4 γH	2.4 γH	γH	85	2.5 γH	3.7 γH	γH	85
Таштагольское:								
до глубины 890 м	1.3 γH	2.5 γH	γH	320	3.5 γH	5 γH	γH	50
ниже глубины 890 м	1.8 γH	3.0 γH	γH	350				
Шерегешевское	1.4 γH	2.6 γH	γH	330	3.8 γH	5.2 γH	γH	48

Прочность вмещающих пород, окружающих горную выработку на месторождениях Горной Шории, определяется действующими напряжениями на срез. В боках и кровле выработок напряжения на срез могут быть найдены из выражения [25]:

$$\tau_{\text{ср}} = 0.5 \left(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp} + 2 \frac{a_{\text{ш}}}{h_{\text{в}}} \sigma_{\parallel} \right),$$

где σ_{\parallel} , σ_{\perp} — горизонтальная составляющая напряжения в массиве, действующая вдоль и перпендикулярно оси выработки; $a_{\text{ш}}$, $h_{\text{в}}$ — ширина и высота выработки, м.

Если совпадают направления выработки и максимальной горизонтальной составляющей напряжения, то касательные напряжения в кровле и боках выработки рассчитываются соответственно из выражений:

$$\tau_{\text{ср}}^{\text{к}} = 0.5 \left(\sigma_1 - \sigma_2 + 2 \frac{h_{\text{в}}}{a_{\text{ш}}} \sigma_1 \right),$$

$$\tau_{\text{ср}}^{\text{б}} = 0.5 \left(\sigma_2 - \sigma_3 + 2 \frac{a_{\text{ш}}}{h_{\text{в}}} \sigma_3 \right).$$

Когда совпадают направления выработки и минимальной горизонтальной составляющей σ_1 , касательные напряжения в кровле и боках выработки рассчитываются соответственно из выражений:

$$\tau_{\text{ср}}^{\text{к}} = 0.5 \left(\sigma_2 - \sigma_3 + 2 \frac{h_{\text{в}}}{a_{\text{ш}}} \sigma_2 \right),$$

$$\tau_{\text{ср}}^{\text{б}} = 0.5 \left(\sigma_2 - \sigma_3 + 2 \frac{a_{\text{ш}}}{h_{\text{в}}} \sigma_3 \right),$$

здесь σ_1 , σ_2 — минимальная и максимальная горизонтальные составляющие напряжения соответственно; σ_3 — вертикальная составляющая напряжения; $\sigma_3 = \gamma H$.

Напряжение на срез для пород кровли и боков выработок, расположенных под углом к максимальной горизонтальной составляющей напряжения, определяется по формуле

$$\tau_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{\tau_{\text{min.ср}}^2}{1 - \varepsilon^2 \cos^2(\theta)}},$$

где $\tau_{\text{min.ср}}$ — минимальное действующее напряжение на срез в кровле и боку выработки; ε — эксцентриситет; θ — угол между максимальной горизонтальной составляющей напряжения и осью выработки, изменяющийся от 0 до 90°.

Эксцентриситет находится отдельно для кровли и боков выработки из соотношения

$$\varepsilon^2 = 1 - \frac{\tau_{\text{min.ср}}^2}{\tau_{\text{max.ср}}^2},$$

$\tau_{\text{max.ср}}$ — максимальное напряжение на срез, действующее в кровле или боках выработки.

Коэффициент устойчивости в кровле или в боках горных выработок рассчитывается как

$$K_{yc} = \sqrt{\frac{[\tau_{cp}]}{\tau_{cp}}},$$

где $[\tau_{cp}]$ — предел прочности вмещающих пород на срез, $[\tau_{cp}] = K_{co}[\sigma]\mu$; τ_{cp} — действующее напряжение на срез в кровле или боках выработки; $[\sigma] = f \times 10$ — предел прочности вмещающих пород на одноосное сжатие, МПа; μ — коэффициент Пуассона. Значение K_{co} определяется в зависимости от расстояния между трещинами (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Зависимость коэффициента структурного ослабления K_{co} от трещиноватости пород и руд L_{cp}

Расстояние между трещинами L_{cp} , м	Коэффициент структурного ослабления K_{co}
> 1.5	0.9
1.5 – 1.0	0.8
1.0 – 0.5	0.6
0.5 – 0.2	0.4
< 0.2	0.2

После расчета коэффициента устойчивости горных пород и руд устанавливается категория устойчивости горных пород (табл. 4), конструкция и параметры рудничной крепи. При выборе крепи необходимо учитывать категорию удароопасности на месторождении. По степени удароопасности месторождения или участки горного массива вокруг выработок разделяются на две категории: “Опасно” и “Неопасно”. Категория “Опасно” соответствует напряженному состоянию массива в приконтурной части выработки, при котором может произойти горный удар, а “Неопасно” — неудароопасному состоянию и не требует проведения противоударных мероприятий.

ТАБЛИЦА 4. Категория устойчивости горных пород и руд

Коэффициент устойчивости горных пород	Степень устойчивости	Категория устойчивости
> 1	Весьма устойчивая	I
1.0 – 0.65	Устойчивая	II
0.65 – 0.45	Среднеустойчивая	III
0.45 – 0.25	Неустойчивая	IV
> 0.25	Весьма неустойчивая	V

На основании проведенных многолетних исследований и анализа взаимосвязей параметров при проходке и эксплуатации горных выработок в условиях напряженно-деформированного состояния и удароопасности железорудных месторождений Горной Шории разработана многофакторная цифровая модель “ЕвразрудаКреп” для выбора типа крепи и возможного отставания от забоя в зависимости от глубины заложения, категории устойчивости массива и сечения выработки [26] (рис. 2).

В основу многофакторной цифровой модели “ЕвразрудаКреп” положены результаты анализа рекомендаций и методических указаний институтов ВНИМИ, ВостНИГРИ, ИГД СО РАН, КузГТУ, а также опыта использования различных видов крепи на рудниках Горной Шории и на других железорудных месторождениях, в том числе зарубежных. Устойчивость пород

и руды определяется по методике ИГД СО РАН, учитывающей напряженное состояние горного массива конкретного месторождения. Это важный фактор, потому что снижение устойчивости выработок связано с высоким уровнем действующих напряжений на обрабатываемых глубоких горизонтах массива и повышенной удароопасностью.

Для автоматизированного составления проекта возведения крепи разработаны электронные макеты крепления горных выработок, видов рудничной крепи (поперечные и продольные сечения, узлы крепи, материалы и расход материалов). Электронный макет проекта возведения крепи включает: титульный лист; список лиц, ознакомленных с проектом, с подписями; горно-геологические и горнотехнические данные и заключение об удароопасности горного массива, необходимые для автоматизированного поиска рационального варианта крепи; распечатку результатов обработки заданных условий программой “ЕвразрудаКреп””; графический материал.

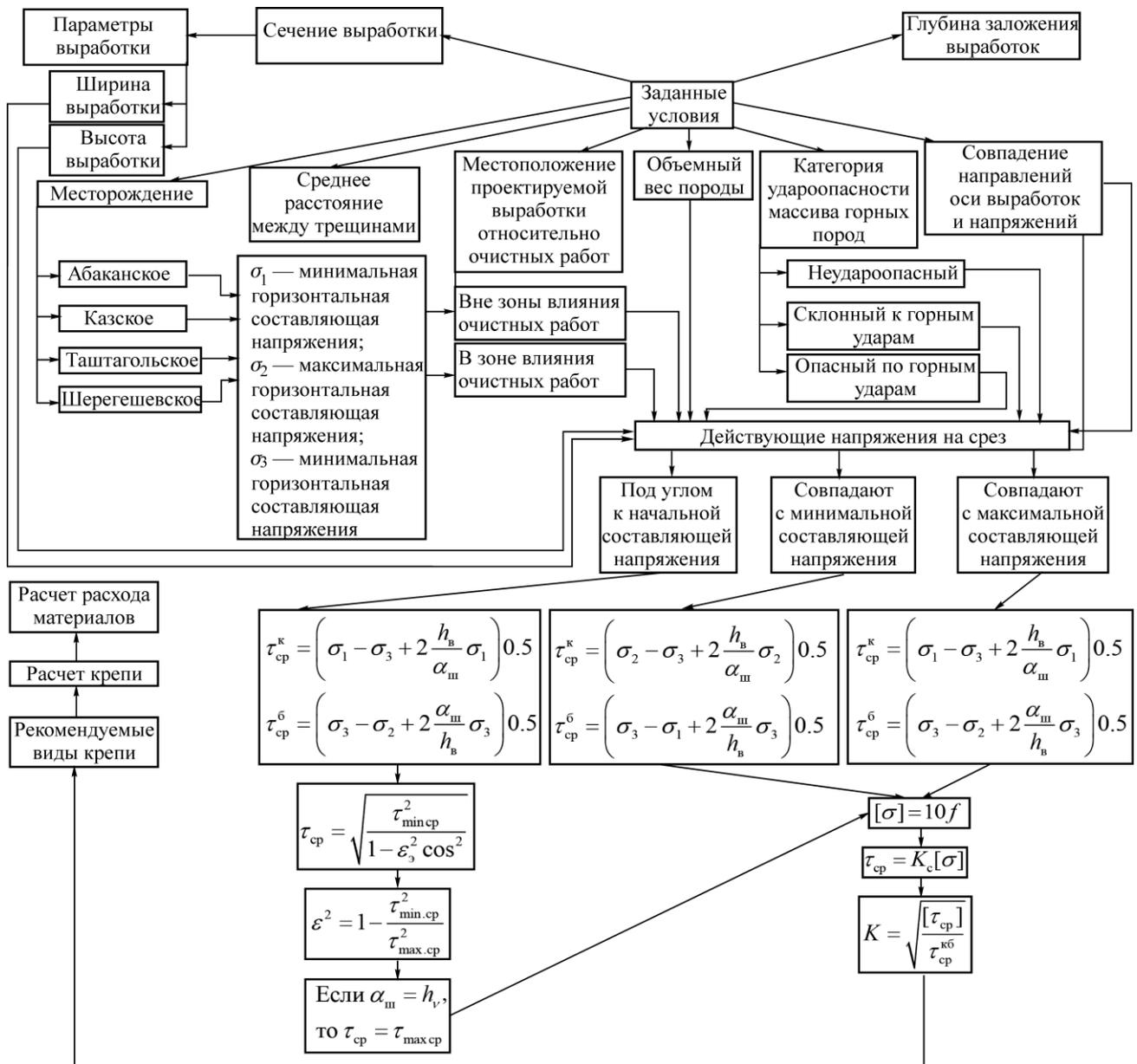


Рис. 2. Многофакторная цифровая модель “ЕвразрудаКреп”

ВЫВОДЫ

Для условий Таштагольского и Шерегешевского месторождений проведен анализ влияния трещиноватости на устойчивость приконтурного массива посредством рассмотрения коэффициента структурного ослабления K_{co} и среднего расстояния между трещинами L_{cp} . Рекомендовано в весьма неустойчивых и удароопасных породах на Шерегешском руднике применять конструкции податливой усиленной комбинированной крепи с фрикционными анкерами. Установлено, что временное сопротивление материала стержня анкеров крепей СЗА составляет более 410 МПа и соответствует требованиям ГОСТа.

С использованием программы “ЕвразрудаКреп” разработано “Методическое руководство по креплению горных выработок и наблюдению за состоянием крепи на руднике ОАО “Евразруда”. Руководство позволяет оперативно решать вопросы выбора вида рудничной крепи в изменяющихся горно-геологических и геодинамических условиях на трассе проходки выработки, а также способствует повышению безопасности горнопроходческих работ при разработке удароопасных железорудных месторождений Горной Шории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Железорудная база России** / В. П. Орлов, Б. М. Алешин, В. М. Аликберов и др. — М.: ООО “Геоинформарк”, 2007. — 871 с.
2. **Шрепп Б. В., Сенкус В. В., Фрянов В. Н., Складар Н. И.** Тектоническая активность глубинных разломов и геомеханические особенности отработки железорудных месторождений Алтае-Саянской складчатой области // ГИАБ. — 2014. — № 1. — С. 169–174.
3. **Лобанова Т. В.** Исследование геомеханического состояния породного массива при формировании и проявлении горных ударов на Таштагольском руднике // ФТПРПИ. — 2008. — № 2. — С. 38–46.
4. **Еременко В. А.** Природные и техногенные факторы возникновения горных ударов при разработке железорудных месторождений Западной Сибири // ГИАБ. — 2012. — № 11. — С. 50–59.
5. **Назаров Л. А., Назарова Л. А., Панов А. В., Мирошниченко Н. А.** Эволюция напряженно-деформированного состояния породного массива при отработке Таштагольского железорудного месторождения по результатам 3D-моделирования // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2016. — Т. 2. — № 2. — С. 87–91.
6. **Инструкция** по безопасному ведению горных работ на рудных, нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам (РД 06-329-99). — М.: ГПНТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000.
7. **Копытов А. И., Лебедев А. А., Утробин Б. А.** Разработка рациональной технологии крепления горных выработок в удароопасных условиях // Вестн. КузГТУ. — 2017. — № 5. — С. 10–15.
8. **Методические указания** по определению устойчивости горного массива при проходке горных выработок, выбору вида крепи на месторождениях склонных к горным ударам и удароопасным в условиях шахт. — Новокузнецк: ОАО “Евразруда”, 2008. — 36 с.
9. **Еременко А. А., Курленя М. В.** Разработка железорудных месторождений в зонах повышенной сейсмической активности // ФТПРПИ. — 1990. — № 1. — С. 3–31.
10. **Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А.** Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.
11. **Руководство** по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам / А. Н. Шабаров, А. А. Филинков, В. В. Зубков и др. — СПб.: СПГУ, 2011. — 76 с.

12. Шапошник Ю. Н., Неверов А. А., Неверов С. А., Конурин А. И., Шокарев Д. А. Разработка технологии забутовки закрепных пустот вспенивающимися материалами // ФТПРПИ. — 2018. — № 2. — С. 63–74.
13. Лушников В. Н., Еременко В. А., Сэнди М. П., Бухер Р. Крепление горных выработок в условиях деформируемых и удароопасных массивов горных пород // Горн. журн. — 2014. — № 4. — С. 37–44.
14. Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шокарев Д. А., Шапошник С. Н., Конурин А. И. Совершенствование технологии крепления выработок на Артемьевской шахте ТОО “Востокцветмет” // ФТПРПИ. — 2017. — № 6. — С. 140–148.
15. Алыменко Д. Н., Соловьев В. А., Аптуков В. Н., Котляр Е. К. О видах крепи сопряжений шахтных стволов и приствольных выработок в соляных породах // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — С. 46–54.
16. Лушников В. Н., Еременко В. А., Сэнди М. П., Косырева М. А. Выбор анкерной крепи для выработок, пройденных в шахтах, склонных к горным ударам // ФТПРПИ. — 2017. — № 3. — С. 86–95.
17. Barton N. R. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design, Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci., 2002, 39 (2). — P. 185–216. doi:10.1016/S1365-1609(02)00011-4.
18. Зенько Д. К., Узбекова А. Р. Основные факторы, влияющие на устойчивость массивов в критериях бенявского (RMR) и Бартона (Q) // ГИАБ. — 2004. — № 6. — С. 273–275.
19. Pantelidis L. Rock slope stability assessment through rock mass classification systems, Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci., 2009, 46 (2). — P. 315–325. doi:10.1016/j.ijrmmms.2008.06.003.
20. Shaposhnik Yu. N., Konurin A. I., Neverov S. A., Neverov A. A., Shaposhnik S. N. Justification of mine working supports in terms of the rating classification of Norwegian Geotechnical Institute, Int. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2016, Vol. II. — P. 519.
21. Jia M.-T., Wang L.-G. Evaluation of rockmass quality based on regionalization variable optimal estimation theory and RMR system in jinchuan mine, No.3 Yantu Lixue, 2010, Vol. 31, No. 6. — P. 1907–1912.
22. ГОСТ 31559-2012 Крепи анкерные. Общие технические условия (с изменением № 1).
23. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение (с изменениями № 1, 2, 3).
24. Зубков А. А., Зубков А. В., Кутлубаев И. М., Латкин В. В. Совершенствование конструкции и технологии установки крепей с фрикционным закреплением // Горн. журн. — 2016. — № 5. — С. 50–53.
25. Зубков А. А., Латкин В. В., Неугомонов С. С., Волков П. В. Перспективные способы крепления горных выработок на подземных рудниках // ГИАБ. Отдельные статьи (специальный выпуск). — 2014. — № 10. — С. 106–117.
26. Копытов А. И., Клюкин Г. К., Морозов С. С., Трипус Т. Е. Прикладная программа “Евразруда-Крепль” расчета устойчивости горного массива, выбора наиболее рациональной конструкции крепи на железорудных месторождениях ОАО “Евразруда” // Вестн. КузГТУ. — 2012. — № 6. — С. 52–53.

Поступила в редакцию 23/X 2019

После доработки 8/VII 2020

Принята к публикации 9/VII 2020