

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ ВЫРАБОТОК В РАЙОНЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ

А.А. Еременко¹, В.А. Еременко²

¹ Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Россия, e-mail: yeryom@misd.ru

² Научно-исследовательский центр «Прикладная геомеханика
и конвергентные горные технологии» Горного института НИТУ МИСИС, Москва, Россия

Аннотация: Выполнен краткий анализ геологической и геомеханической характеристик в районе расположения железорудных месторождений Горной Шории, где находятся мало- и крупноамплитудные нарушения, включающие разломы, мощностью 0,4–10 м, их подвижек по плоскостям нарушений, особенно при ведении горных работ, которые провоцируют геодинамические явления. Определено, что на интенсивность геодинамических явлений оказывают влияние углы встречи выработок с тектоническими нарушениями и их мощность. Методом математического моделирования дана оценка напряженно-деформированного состояния в окрестности выработок в районе тектонических зон. Для расчета построены 3D-модели: 3D-модель выработки, расположенной со стороны висячего бока нарушения мощностью 1–4 м и углом 80°; выработки, находящейся со стороны лежачего бока нарушения мощностью 2 м и углом 30°. Установлено распределение высоких сжимающих вертикальных и горизонтальных напряжений, максимальных растягивающих деформаций и смещений в массиве горных пород на различных расстояниях от забоя выработки и расположения разломов. Определены рациональные расстояния, составляющие $2,5 (12) \div 17$ м, при которых следует применять профилактические мероприятия.

Ключевые слова: выработка, напряжение, мощность, угол падения, месторождение, тектоническое нарушение, очистное пространство, моделирование, программа, смещение, глубина.

Для цитирования: Еременко А. А., Еременко В. А. Моделирование напряженно-деформационного состояния массива горных пород в окрестности выработок в районе тектонических нарушений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10-1. – С. 32–50. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_32.

Modeling of the stress-strain state of the rock massif in the vicinity of mining workings in the area of tectonic disruptions

A.A. Eremenko¹, V.A. Eremenko²

¹ Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia, e-mail: yeryom@misd.ru

² Research Center for Applied Geomechanics and Convergent Technologies at the Mining Institute
of National Research Technological University (MISIS), Moscow, Russia

Abstract: A brief analysis of geological and geomechanical characteristics was performed in the area of the iron ore deposits of Gornaya Shoria, where there are small and large-amplitude faults, including faults with a thickness of 0.4–10 m, their movements along the fault planes, especially during mining operations that provoke geodynamic phenomena. It was determined that the intensity of geodynamic phenomena is influenced by the angles of encounter of workings with tectonic faults and their thickness. Mathematical modeling is used to estimate stress-strain state in the vicinity of workings in the area of tectonic zones. For the calculation, 3D models were built: a 3D model of the mine, located on the side of the hanging side of the disturbance with a thickness of 1–4 m and an angle of 80°; workings located on the side of the prone side of the disturbance with a thickness of 2 m and an angle of 30°. The distribution of high compressive vertical and horizontal stresses, maximum tensile deformations and displacements in the rock mass at various distances from the working face and the location of faults has been established. Rational distances of $2.5 (12) \div 17$ m were determined, at which preventive measures should be applied.

Key words: production, stress, power, dip angle, field, fault, treatment area, simulation, program, mix, depth.

For citation: Eremenko A. A., Eremenko V. A. Modeling of the stress-strain state of the rock massif in the vicinity of mining workings in the area of tectonic disruptions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10-1):32-50. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_32.

Введение

Существенным фактором, осложняющим ведение подготовительных, нарезных и очистных работ на месторождениях полезных ископаемых, является наличие в массиве тектонических нарушений. Рудное тело и вмещающие породы представляют собой геологическую среду, в которой имеют место нарушения в виде поверхностей ослабления [1–4]. Так, на месторождениях железных руд Горной Шории значительное количество динамических проявлений горного давления наблюдается в районах расположения мало- и крупноамплитудных нарушений, где тектонические разрывы являются границами относительно сплошных блоков горных пород и происходит высвобождение упругой энергии массива в виде его подвижек по плоскостям нарушений [5–9].

На Таштагольском и Шерегешевском удароопасных рудных месторождениях выявлены мощные тектонические нарушения более 1 м на Восточном участке; диагональные, восточное; пологие, ко-

торые разделяются на несколько ветвей [10, 11]. Тектонические нарушения заполнены кварц-карбонатным материалом и др.; мощностью 0,4÷10 м; протяженностью — 500 м и более.

На участках Болотный, Главный и Новый Шерегеш расположены тектонические нарушения северо-восточного, субмеридионального, юго-западного направлений сдвигово-сбросового типа; мощностью — 0,5÷20 м; протяженностью — 80÷1800 м.

Углы встречи выработок с тектоническими нарушениями мощностью 1 м и более, углы их падения и мощность оказывают существенное влияние на напряженное состояние горных пород при приближении забоев к нарушениям, которое вызывает геодинамические явления разной интенсивности [12–14].

Для прогноза особенностей формирования полей напряжений необходимо рассмотреть различные варианты расположения нарушений относительно выработок методами математического моделирования [15–17].

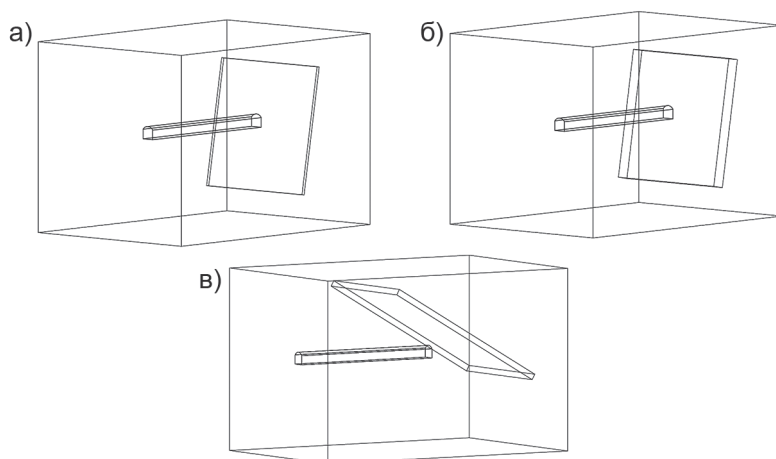


Рис. 1. 3D-модели вариантов: 3D-модель выработки со стороны висячего бока нарушения мощностью 1 м и углом 80° , расстояние от забоя выработки до нарушения 2,5 м (а); 3D-модель выработки со стороны висячего бока нарушения мощностью 4 м и углом 80° , расстояние от выработки до разлома 2,5 м (б); 3D-модель выработки со стороны лежащего бока нарушения мощностью 2 м и углом 30° , расстояние от выработки до нарушения 15 м (в)

Fig. 1. 3D-models of options: 3D-model of mining from the side of a hanging disturbance with a thickness of 1 m and an angle of 80° , the distance from the mine face to the disturbance is 2.5 m (a); 3D model of working from the side of the suspended side of the disturbance with a thickness of 4 m and an angle of 80° , the distance from the working to the fault is 2.5 m (b); 3D model of working from the side of the recumbent side of the disturbance with a thickness of 2 m and an angle of 30° , the distance from the working to the disturbance is 15 m (v)

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива в окрестности выработок в районе тектонических зон

Установление особенностей и закономерностей деформирования массива

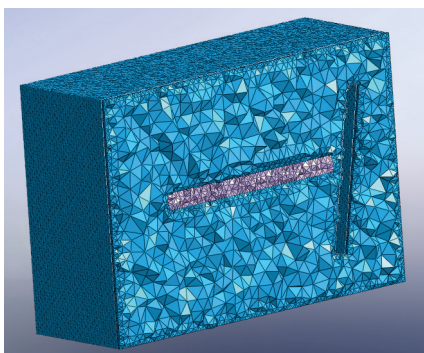


Рис. 2. Сетка конечных элементов конструктивных элементов горнотехнической системы и разлома

Fig. 2. Grid of finite elements of structural elements of mining system and fault

в районах геологических нарушений с помощью математического моделирования возможно при непосредственном включении их в расчетную схему рассматриваемого объекта [18].

Для расчета построены 3D-модели трех исследуемых вариантов (рис. 1, а–в) участков выработок размерами $87 \times 60 \times 60$ м с различными параметрами мощности, углами падения и расположения нарушений по отношению к выработке и 3D-модель исследуемого участка очистного пространства размерами $1074 \times 410 \times 589$ м (рис. 2).

Для проведения численного моделирования выполнялось построение сетки конечных элементов для всех конструктивных элементов моделей (рис. 2).

Для проведения численного моделирования заданы физико-механические свойства руды и породы (табл. 1).

Параметры моделирования (варианты а–в) представлены в табл. 2–4.

Таблица 1

Физико-механические свойства руды и породы
Physical and mechanical properties of ore and rock

Параметр	Единицы измерения	Значение
Объемный вес руды, γ	т/м ³	4,2
Объемный вес породы, γ	т/м ³	2,9
Модуль упругости, E	ГПа	85,3
Коэффициент Пуассона, ν	—	0,21
Сцепление, C	МПа	6,2
Угол внутреннего трения, ϕ	°	40
Прочность на растяжение руды, σ_p	МПа	13
Прочность на растяжение породы, σ_p	МПа	14
Геологический индекс прочности GSI	—	35
Коэффициент нарушения D	—	0,8

Вариант *a* включал проведение выработки размерами 4×4 м, протяженностью 50 м на глубине 820 м, где главные напряжения $\sigma_1 \div \sigma_3$ колеблются от 24 600 до 31 500 кН/м² (см. табл. 2), при мощности тектонического нарушения (разломы) 1 м.

Параметры численного моделирования по варианту *b* приняты такие же, как в варианте *a*, кроме мощности нарушения, равного 4 м. Критерии устойчи-

вости вмещающего массива представлены в табл. 5.

Для численных расчетов и анализа использовался программный комплекс Midas GTS NX, встроенный САПР для построения сложных трехмерных моделей, а также анализа и визуализации горного давления и деформаций в массиве и на контуре выработок.

Критериями для оценки устойчивости целиков и вмещающего массива вы-

Таблица 2

Параметры численного моделирования (вариант a)
Numerical simulation parameters (option a)

Параметр	Единицы измерения	Параметры модели, конструктивных элементов и условия моделирования
Высота участка массива	м	60
Ширина участка массива	м	60
Длина участка массива	м	87
Высота выработки	м	4
Ширина выработки	м	4
Длина выработки	м	50
Мощность разлома	м	1
Угол наклона разлома	°	80
Расстояние от забоя выработки до разлома	м	2,5
Глубина ведения горных работ	м	820
Главные напряжения	кН/м ²	$\sigma_3 = 24\,600$ (вертикальное) $\sigma_1 = 61\,500$ (горизонтальное) $\sigma_2 = 31\,500$ (горизонтальное)

Таблица 3

Параметры численного моделирования (вариант б)
Numerical modeling parameters (option b)

Параметр	Единицы измерения	Параметры модели, конструктивных элементов и условия моделирования
Высота участка массива	м	60
Ширина участка массива	м	60
Длина участка массива	м	87
Высота выработки	м	4
Ширина выработки	м	4
Длина выработки	м	50
Мощность разлома	м	4
Угол наклона разлома	°	80
Расстояние от забоя выработки до разлома	м	2,5
Глубина ведения горных работ	м	820
Главные напряжения	кН/м ²	$\sigma_3 = 24\ 600$ (вертикальное) $\sigma_1 = 61\ 500$ (горизонтальное) $\sigma_2 = 31\ 500$ (горизонтальное)

работок и очистного пространства являлись: максимальное напряжение $\sigma_{\max}$ (избыточное напряжение $\Delta\sigma$), смещение массива X и деформация растяжения массива ϵ .

Избыточное напряжение $\Delta\sigma$ — это критерий, показывающий наличие нап-

ряжения в массиве, которое по своей величине больше прочностных свойств и характеристик пород в рассматриваемых условиях. Если значение избыточного напряжения $\Delta\sigma < 0$, то оно меньше прочности массива горных пород, и выработки прогнозируемо находятся в ус-

Таблица 4

Параметры численного моделирования (вариант в)
Numerical simulation parameters (option c)

Параметр	Единицы измерения	Параметры модели, конструктивных элементов и условия моделирования
Высота участка массива	м	60
Ширина участка массива	м	60
Длина участка массива	м	87
Высота выработки	м	4
Ширина выработки	м	4
Длина выработки	м	50
Мощность разлома	м	2
Угол наклона разлома	°	30
Расстояние от забоя выработки до разлома	м	15
Глубина ведения горных работ	м	820
Главные напряжения	кН/м ²	$\sigma_3 = 24\ 600$ (вертикальное) $\sigma_1 = 61\ 500$ (горизонтальное) $\sigma_2 = 31\ 500$ (горизонтальное)

Таблица 5

Критерий устойчивости вмещающего массива, применяемый к численным моделям
Stability criterion of the enclosing array applied to numerical models

Диапазон максимальных смещений X^* , м	Описание процессов и событий
0,000÷0,075	низкая вероятность деформаций и обрушений
0,076÷0,140	средняя вероятность деформаций и обрушений
0,0141÷0,260	вероятны малообъемные обрушения
0,261÷0,480	вероятны среднеобъемные обрушения ($KЗП^{**} < 1,3 \div 1,5$)
0,481÷>0,65	вероятны крупнообъемные обрушения ($KЗП^{**} < 1,2 \div 1,3$)
* Определен по результатам многолетних натурных наблюдений. ** Допустимым коэффициентом запаса прочности целиков (при проектировании параметров горных работ) при численном анализе в условиях высокой степени достоверности исходных входных параметров в численную модель считается $KЗП \geq 1,5$.	

тойчивом состоянии. Если $\Delta\sigma > 0$, то напряжение превышает предел прочности массива горных пород, и на контуре выработки возможны шелушение, интенсивное заколообразование и другие негативные факторы проявления горного давления.

Для оценки НДС массива горных пород в результате действия избыточного напряжения (т.е. напряжения, превышающего предельное) при упругом анализе использовался критерий прочности Хука–Брауна, который является функцией максимального и минимального значений главных напряжений, а также прочностных свойств массива горных пород. Этот критерий особенно хорошо подходит для оценки устойчивости скального массива, которым представлены рассматриваемые условия.

Результаты численных расчетов максимальных смещений X во вмещающем массиве оценивались по критерию устойчивости массива, применяемому к численным моделям, разработанному компанией Abaqus на основе шахтных наблюдений и сопоставления их с результатами численного моделирования (см. табл. 5).

В качестве критерия, характеризующего состояние вторичного поля напря-

жений, принята деформация растяжения массива: $\varepsilon = \Delta L/L$, ΔL — изменение исходного размера деформируемого объекта, м; L — исходный размер деформируемого объекта, м.

Установлено, что первые трещины растяжения регистрируются при уровне деформаций растяжения $\varepsilon = 0,00015$, что является критическим значением объемного трещинообразования. В шахтных условиях при значениях $\varepsilon = 0,00035$ в массиве отмечаются первые трещины растяжения, а с увеличением ε до 0,00050–0,00080 и более массив начинает интенсивно деформироваться, образуются своды и зоны возможного обрушения. Поэтому в качестве численного критерия, определяющего внешнюю континуальную границу вторичного поля напряжений, принято значение $\varepsilon = 0,00035$, соответствующее деформации, при которой наблюдаются первые трещины растяжения в массиве.

Моделирование состояния массива горных пород в окрестности выработки

Вариант а (мощность разлома 1 м под углом 80°)

На рис. 3–6 приведены разрезы численной модели по осям; результаты чис-

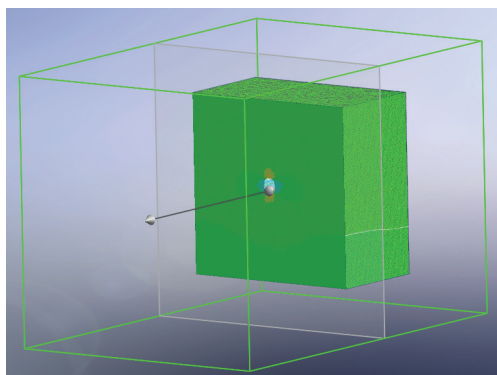


Рис. 3. Разрезы численной модели по осям: разрез численной модели шахты по оси X (а); разрез численной модели шахты по оси Y (б)

Fig. 3. Sections of the numerical model of the shaft along the axes: section of the numerical model of the shaft along the X axis (a); section of the numerical model of the shaft along the Y axis (b)

ленного моделирования в программе Midas с определением вертикальных и горизонтальных напряжений в массиве по простиранию и вкрест простирания

выработки в окрестности тектонического нарушения мощностью 1 м.

Расчеты по варианту а показали, что при проведении выработки на расстоянии 2,5 м от забоя до тектонического нарушения формируется зона высоких концентраций сжимающих вертикальных напряжений со стороны висячего бока нарушения на уровне выработки с $\sigma_{\max3}$, равным 47 МПа, глубиной 1 м (см. рис. 3); по контуру выработки в районе забоя формируется зона высоких концентраций горизонтальных сжимающих напряжений с $\sigma_{\max2}$, 1 МПа, глубиной до 1 м, действующих вкрест простирания выработки (см. рис. 3). При $\sigma_{\text{СК}} = 130$ МПа крайне удароопасная ситуация (условия горного удара), допускается действие напряжений $\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{СК}}/2$, где $\sigma_{\text{СК}}$ — сжимающие напряжения.

Следует отметить, что представлены идеальные условия без учета влияния

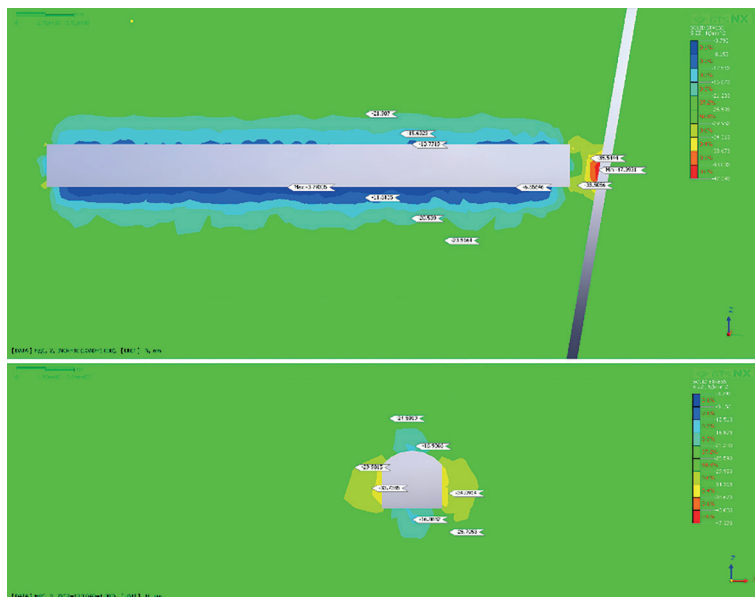


Рис. 4. Результаты численного моделирования в программе Midas с определением вертикальных напряжений в массиве на завершающей расчетной стадии. S-ZZ — вертикальные напряжения: диапазон напряжений $-3,793 \div -47,393$ МПа. Маркеры на рисунках разрезов моделей показывают рассчитанные значения величин в точках их установки

Fig. 4. Results of numerical modeling in Midas with determination of vertical stresses in the mass at the final design stage. S-ZZ — vertical stresses: stress range $-3,793 \div -47,393$ MPa. Marker in the figures of model sections show the calculated values of the values at their installation points



Рис. 5. Результаты численного моделирования в программе Midas с определением горизонтальных напряжений в массиве на завершающей расчетной стадии: S-YY — горизонтальные напряжения по оси Y (по простиранию выработки) при диапазоне напряжений $-4,257 \div -91,226$ МПа

Fig. 5. Results of numerical modeling in the Midas program with determination of horizontal and horizontal stresses in the massif at the final design stage. S-YY — horizontal stresses along the Y axis (along the strike of the mine) at the stress diap zone $-4.257 \div -91.226$ MPa

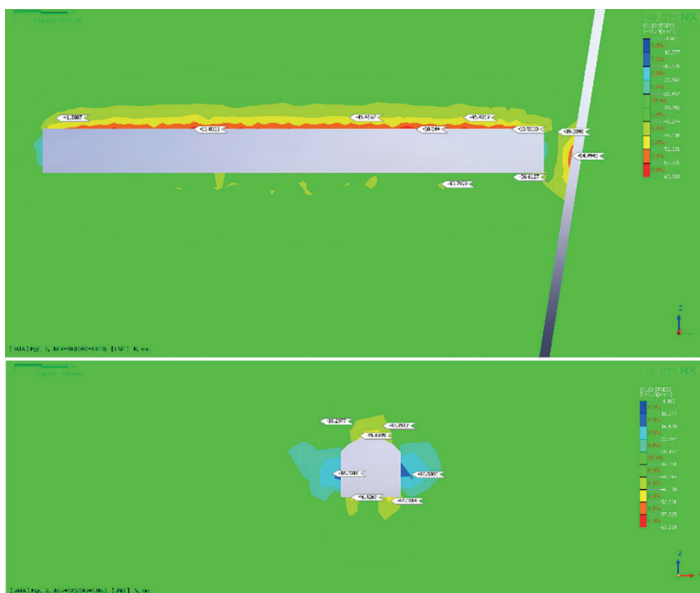


Рис. 6. Результаты численного моделирования в программе Midas с определением горизонтальных напряжений в массиве на завершающей расчетной стадии. S-XX — горизонтальные напряжения по оси X (вкрест простирания выработки) при диапазоне напряжений $-4,883 \div -63,818$ МПа

Fig. 6. Results of numerical modeling in the Midas program with determination of horizontal stresses in the massif at the final design stage. S-XX — horizontal stresses along the X axis (in the cross of the mine strike) at the stress diap zone $-4.883 \div -63.818$ MPa

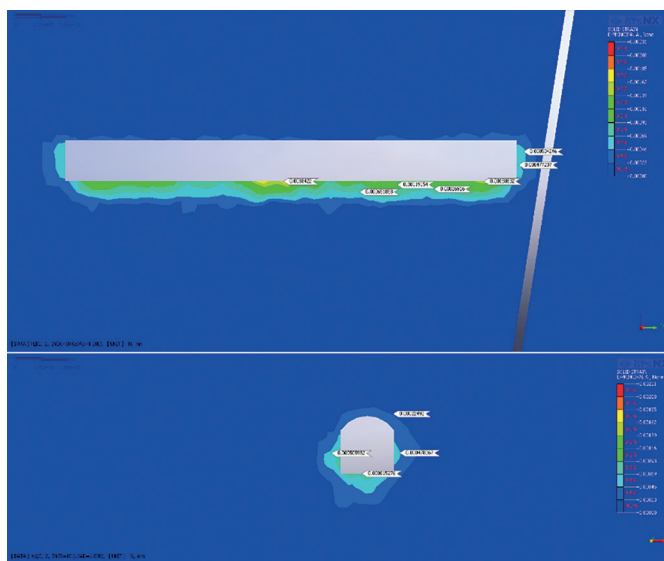


Рис. 7. Результаты численного моделирования с определением растягивающих деформаций в массиве на завершающей расчетной стадии. **SOLID STRAIN E-PRINCIPAL A** — максимальные растягивающие деформации ε в массиве: диапазон растягивающих деформаций $0,00000 \div 0,00231$

Fig. 7. Results of numerical modeling with determination of tensile deformations in the mass at the final design stage. **SOLID STRAIN E-PRINCIPAL A** — maximum tensile strains of ε in the mass: tensile strain range $0.00000 \div 0.00231$

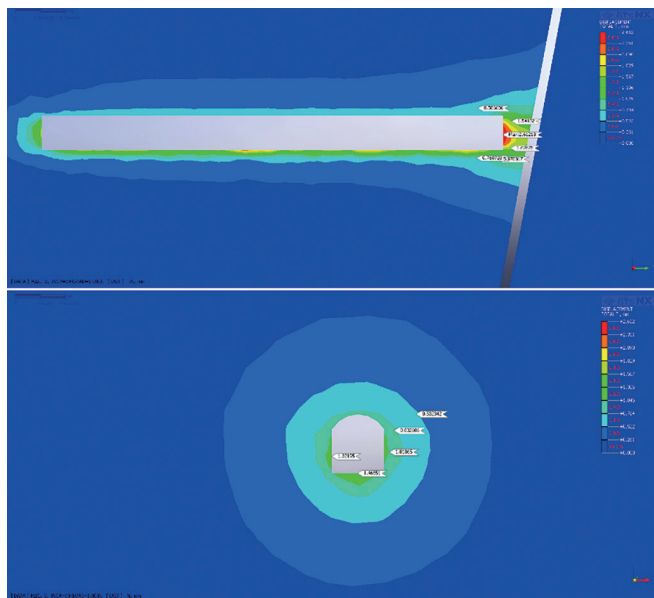


Рис. 8. Результаты численного моделирования с определением максимальных смещений X вмещающего массива на завершающей расчетной стадии. **DISPLACEMENT TOTAL T** — максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.000 \div 2,612$ мм

Fig. 8. Results of numerical modeling with determination of maximum displacements X of the enclosing array at the final design stage. **DISPLACEMENT TOTAL T** — maximum displacements at the final design stage: displacement range $0.000 \div 2.612$ mm

взрывных работ (ВР). В действительности массив на глубину 1–2 м нарушен наведенными трещинами от ВР, поэтому массив между забоем выработки и разломом при расстоянии 2,5 м полностью разгружен и неудароопасен (см. рис. 5, 6).

Маркеры на рисунках разрезов моделей показывают рассчитанные значения величин в точках их установки. Результаты численного моделирования с определением растягивающих деформаций и смещений массива на завершающей расчетной стадии показаны на рис. 7, 8.

Максимальные растягивающие деформации $\varepsilon > 0,00035$ (см. рис. 7) также являются отрицательным фактором. Трещины раскрываются, однако в упругих и хрупких массивах внешнее триггерное воздействие может спровоцировать их лавинообразное распространение в форме горного удара. Определены незначительные смещения (скальная пластичность мало развита из-за свойств массива, что является отрицательным фактором в удароопасных условиях) (см. рис. 8), но они имеют такие же действия, как и растягивающие деформации.

При условии, если расстояние между забоем выработки и разломом 5 м, картина формируется следующая: массив на глубину 1–2 м нарушен наведенными трещинами от ВР, т.е. остается устойчивая и удароопасная часть массива у нарушения мощностью 3 м. Взрыв шпуровых зарядов ВВ является триггером, который может спровоцировать горный удар в процессе проведения выработки. Наиболее благоприятная обстановка — когда расстояние между забоем и разломом равно 12 м. Отнимаем глубину зоны наведенной трещиноватости 2 м, и остается 10 м устойчивого массива, напряжения при этом $\sigma_{\max 2}$ и $\sigma_{\max 3}$ снижаются до допустимых пределов $\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{сж}} / 2$.

Вариант 6 (мощность разлома 4 м, угол 80°)

На рис. 9–11 также приведены результаты численного моделирования с определением горизонтальных и вертикальных напряжений в массиве по простиранию и вкрест простирания выработки в окрестности тектонического нарушения мощностью 4 м.

При проведении выработки на расстоянии 2,5 м от забоя до нарушения формируется зона высоких концентраций сжимающих вертикальных напряжений со стороны висячего бока нарушения на уровне выработки $\sigma_{\max 3}$ 48 МПа глубиной 1,5 м (см. рис. 9); по контуру выработки в районе забоя формируется зона высоких концентраций горизонтальных сжимающих напряжений $\sigma_{\max 2}$ 87,5 МПа глубиной до 2–4 м и более, действующих вкрест простирания выработки (см. рис. 10). При увеличении мощности нарушения до 4 м объемы зон концентрации максимальных напряжений увеличиваются значительно. Следует отметить, что выше представлены идеальные условия без учета влияния ВР. В действительности массив на глубину 1–2 м нарушен наведенными трещинами от ВР, поэтому массив между забоем выработки и нарушениями при расстоянии 2,5 м полностью разгружен и неудароопасен.

Наиболее благоприятным сценарием является расстояние между забоем и нарушением, равное 17 м. Без глубины зоны наведенной трещиноватости, равной 2 м, остается 15 м устойчивого массива, напряжения $\sigma_{\max 2}$ и $\sigma_{\max 3}$ при этом снижаются до допустимых пределов.

Характер распределения растягивающих деформаций и максимальных смещений массива представлен на рис. 12 и 13.

Таким образом, расчеты по варианту 6 позволили выявить особенности распределения напряжений и деформаций

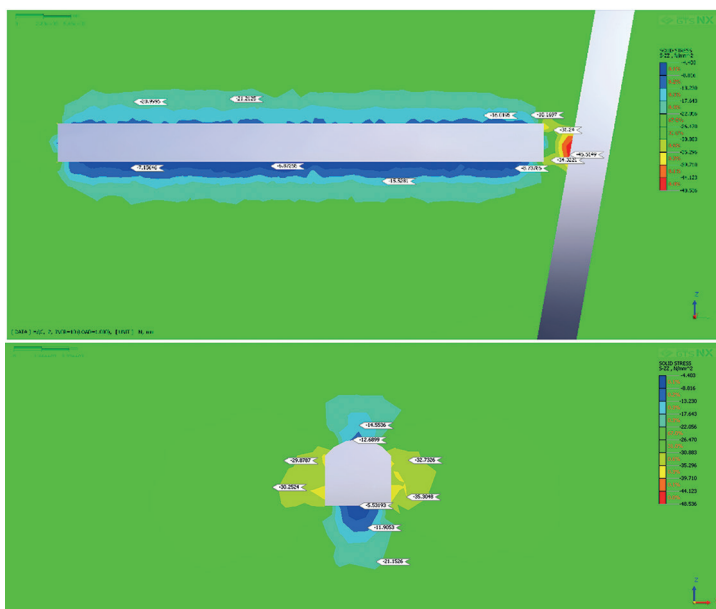


Рис. 9. Результаты численного моделирования с определением вертикальных напряжений в массиве. S_{-ZZ} — вертикальные напряжения при диапазоне напряжений $-4,400 \div -48,536$ МПа

Fig. 9. Results of numerical modeling with determination of vertical stresses in the array. S_{-ZZ} — vertical stresses at the stress diap zone $-4.400 \div -48.536$ MPa



Рис. 10. Результаты численного моделирования с определением горизонтальных напряжений в массиве. S_{-YY} — горизонтальные напряжения по оси Y (по простиранию выработки) при диапазоне напряжений $-5,852 \div -87,990$ МПа

Fig. 10. Results of numerical modeling with determination of horizontal stresses in the array. S_{-YY} — horizontal stresses along Y axis (along depletion) at the stress diap zone $-5.852 \div -87.990$ MPa

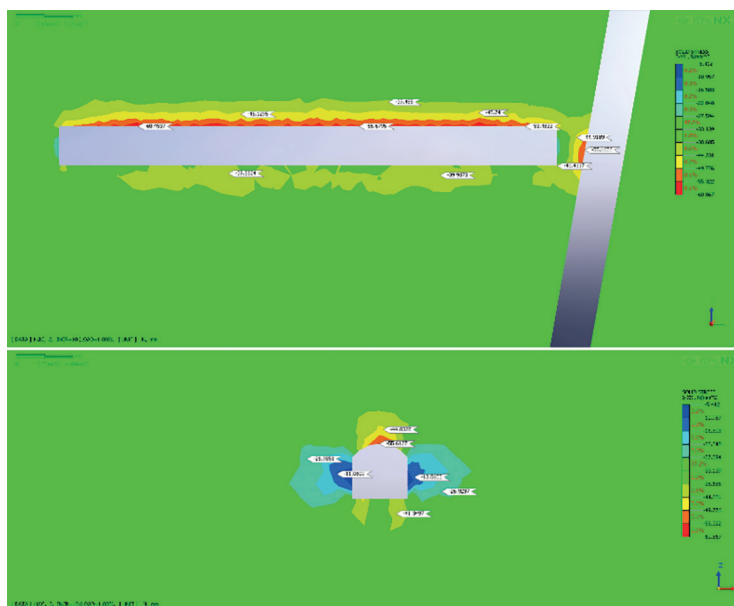


Рис. 11. Результаты численного моделирования с определением горизонтальных напряжений в массиве. S_{-XX} — горизонтальные напряжения по оси X (вкрест простирания выработки): диапазон напряжений $-5,412 \div -60,867$ МПа

Fig. 11. Results of numerical modeling with determination of horizontal stresses in the array. S_{-XX} — horizontal stresses along the X axis (in the cross of the mine strike): stress range $-5,412 \div -60,867$ MPa

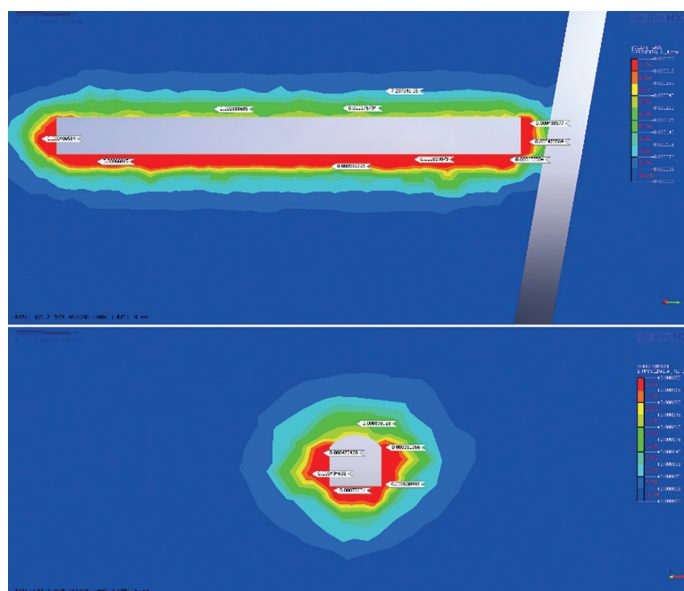


Рис. 12. Результаты численного моделирования с определением растягивающих деформаций в массиве. $SOLID\ STRAIN\ E-PRINCIPAL\ A$ — максимальные растягивающие деформации ε в массиве: диапазон растягивающих деформаций $0,00000 \div 0,002038$

Fig. 12. Results of numerical modeling with determination of tensile deformations in the array. $SOLID\ STRAIN\ E-PRINCIPAL\ A$ — maximum tensile strains of ε in the mass: tensile strain range $0,00000 \div 0,002038$

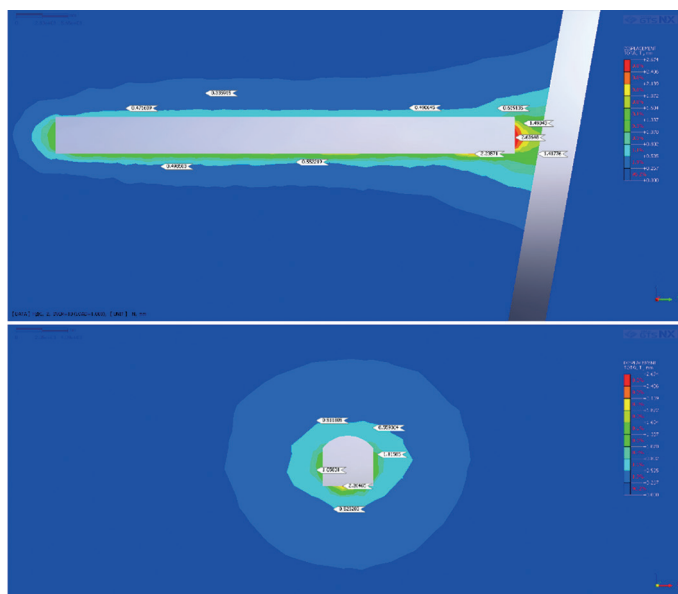


Рис. 13. Результаты численного моделирования с определением максимальных смещений X вмещающего массива. $DISPLACEMENT\ TOTAL\ T$ — максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.000 \div 2.674$ мм

Fig. 13. Results of numerical modeling with determination of maximum displacements X of the enclosing array. $DISPLACEMENT\ TOTAL\ T$ — maximum displacements at the final design stage: displacement range $0.000 \div 2.674$ mm

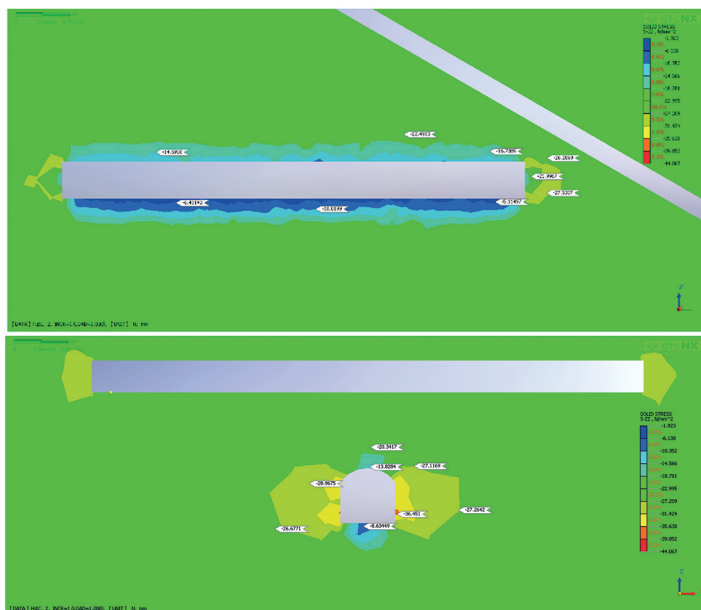


Рис. 14. Результаты численного моделирования с определением вертикальных напряжений в массиве. $S-ZZ$ — вертикальные напряжения при диапазоне напряжений $-1.923 \div -44.067$ МПа

Fig. 14. Results of numerical modeling with determination of vertical stresses in the array. $S-ZZ$ — vertical stresses at the stress diap zone $-1.923 \div -44.067$ MPa

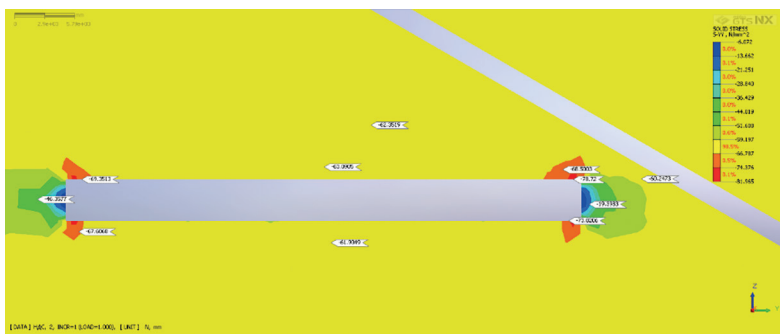


Рис. 15. Численное моделирование по определению горизонтальных напряжений в массиве. $S-YY$ — горизонтальные напряжения по оси Y (по простиранию выработки): диапазон напряжений $-6,072 \div -81,965$ МПа

Fig. 15. Numerical modeling to determine horizontal stresses in the mass. $S-YY$ — horizontal stresses along the Y axis (along the strike of the work): stress range $-6.072 \div -81.965$ MPa

в массиве при проведении выработки в окрестности нарушения мощностью 4 м. Установлено некоторое отличие в сравнении с условиями по варианту a .

Вариант в (мощность разлома 2 м, угол 30°)

Результаты расчетов по модели b представлены на рис. 14–18. Из рисунков видно, что при приближении выработки к разлому на расстояние 15 м формируются вертикальные и горизонтальные напряжения, а также растягивающие деформации и смещения в массиве горных пород в окрестности выработки и разлома.

Результаты расчетов показали, что при проведении выработки на расстоянии 15 м от забоя до нарушения формируется зона высоких концентраций горизонтальных сжимающих напряжений $\sigma_{\max 2}$ 87,5 МПа по контуру забойной части выработки глубиной до 2 м, действующих вкрест простирания выработки (см. рис. 15), и $\sigma_{\max 1}$ 63,3 МПа, действующих по простиранию выработки (см. рис. 16). Нарушение не оказывает влияния на выработку без производств и взрывных работ.

Приближение забоя выработки к нарушению оказывает влияние в области ее кровли и до свода, где происходит

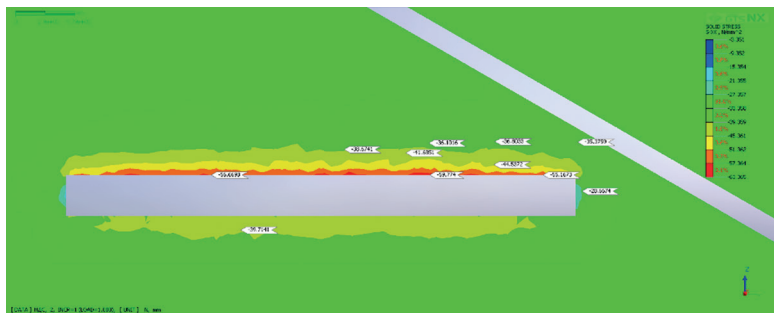


Рис. 16. Численное моделирование по определению горизонтальных напряжений в массиве. $S-XX$ — горизонтальные напряжения по оси X (вкрест простирания выработки): диапазон напряжений $-3,351 \div -63,365$ МПа

Fig. 16. Numerical modeling to determine horizontal stresses in the mass. $S-XX$ — horizontal stresses along the X axis (in the direction of the workings): stress range $-3.351 \div -63.365$ MPa

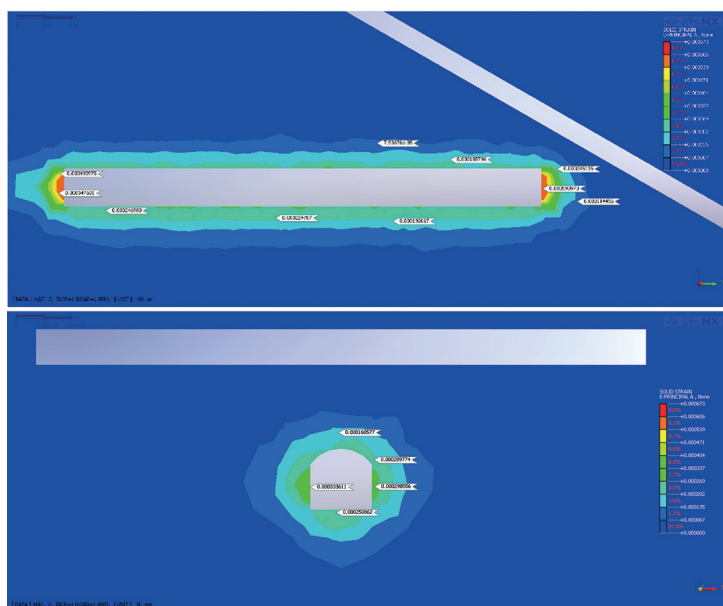


Рис. 17. Численное моделирование по определению растягивающих деформаций в массиве. **SOLID STRAIN E-PRINCIPAL A** — максимальные растягивающие деформации ε в массиве: диапазон растягивающих деформаций $0,00000 \div 0,000673$

Fig. 17. Numerical modeling to determine the tensile strains in the array. **SOLID STRAIN E-PRINCIPAL A** — maximum tensile strains ε in the array: range of tensile strains $0.00000 \div 0.000673$

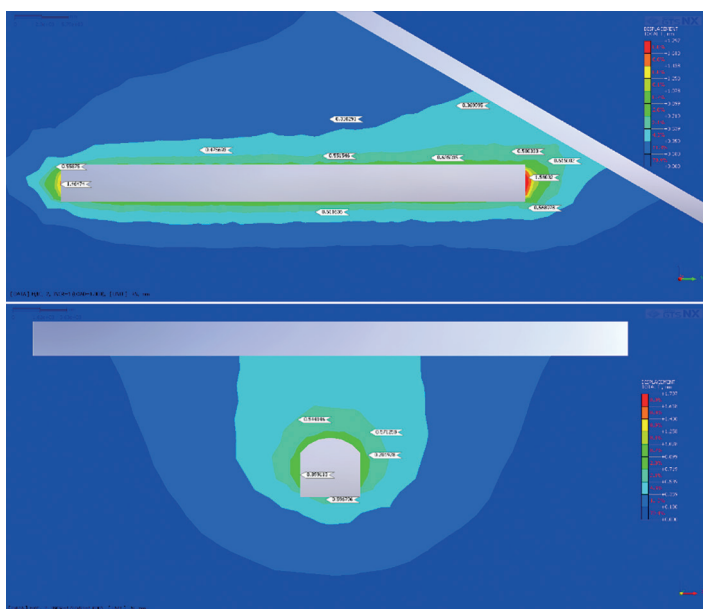


Рис. 18. Численное моделирование по определению максимальных смещений X вмещающего массива. **DISPLACEMENT TOTAL T** — максимальные смещения на завершающей расчетной стадии: диапазон смещений $0.000 \div 1,797$ мм

Fig. 18. Numerical modeling to determine the maximum displacements of the host array. **DISPLACEMENT TOTAL T** — maximum displacements at the final calculation stage: displacement range $0.000 \div 1.797$ mm

формирование удароопасного участка во вмещающем массиве.

Определены максимальные растягивающие деформации $\varepsilon > 0,00035$ (см. рис. 17), которые формируются в забое выработки на глубину до 1 м и являются отрицательным фактором. Трещины раскрываются, однако в упругих и хрупких массивах при внешнем триггерном воздействии может быть спровоцировано их лавинообразное распространение в виде геодинамических явлений. Полученные незначительные смещения из-за упругих свойств массива являются отрицательным фактором в удароопасных условиях.

Выводы

Железорудные месторождения Горной Шории располагаются в сейсмоактивной Алтае-Саянской складчатой горной области, в которой периодически активизируются тектонические разломы земной коры. Происходящие в массиве горных пород природные геодинамические процессы влияют на безопасное состояние подземных выработок и на все горнорудное производство. С другой стороны, на состояние массива горных пород существенное влияние оказывают техногенные воздействия, формируемые отработкой рудных тел. Высокий уровень напряжений в блочном массиве, ведение горных работ приводят к техногенным землетрясениям, горным ударам, микроударам и толчкам. Определены некоторые условия формирования удароопасной обстановки на месторождениях, связанные с деформационными процессами в массиве горных пород, осложненном тектоническими нарушениями.

В представленной работе дано решение научной задачи установления закономерностей напряженно-деформированного состояния массива и распределения геодинамических явлений

различной интенсивности в зонах тектонических нарушений мощностью более 1 м, и на этой основе разработана методика прогнозирования горных ударов при проведении выработок на Таштагольском и Шерегешевском месторождениях.

Определена закономерность распределения сильных геодинамических явлений в районе геологических нарушений.

Разработаны геолого-геометрические модели месторождений, предусматривающие закономерную приуроченность и пространственную взаимосвязь проявления горного давления в динамической форме с разрывными нарушениями.

Составлены классификации и выделены геодинамически опасные разрывные нарушения.

Дана оценка НДС массива горных пород при проведении горных выработок в окрестности тектонических нарушений различной мощности:

- определены величины зоны дезинтеграции горных пород (I) от 0,48 до 1,9 м, наведенной трещиноватости (II) от 1,68 до 7,59 м и микротрещиноватости (III) от 4,44 до 21,55 м при взрыве зарядов ВВ;

- при проведении выработки на расстоянии 2,5 м от забоя до тектонического нарушения формируется зона высоких концентраций сжимающих вертикальных напряжений со стороны висячего бока нарушения на уровне выработки $\sigma_{\max 3} = 47$ МПа на глубину 1 м; по контуру выработки в районе забоя формируется зона высоких концентраций горизонтальных сжимающих напряжений $\sigma_{\max 2} = 91$ МПа глубиной до 1 м, действующих вкрест простирания выработки. При $\sigma_{\text{сж}} = -130$ МПа — это крайне удароопасная ситуация (условия горного удара), допускается действие напряжений $\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{сж}} / 2$;

- при условии, если расстояние между забоем выработки и разломом 45 м, картина формируется следующая: на глубину 1–2 м массив нарушен наведенными трещинами, т.е. остается устойчивая и удароопасная часть массива у нарушения шириной 3 м;

- наиболее благоприятным сценарием является расстояние между забоем и разломом, равное 12 м, а без глубины зоны наведенной трещиноватости 2 м остается 10 м устойчивого массива, напряжения $\sigma_{\max 2}$ и $\sigma_{\max 3}$ при этом снижаются до допустимых пределов;

- при проведении выработки на расстоянии 2,5 м от забоя до нарушения формируется зона высоких концентраций сжимающих вертикальных напряжений со стороны висячего бока нарушения на уровне выработки $\sigma_{\max 3}$ 48 МПа, глубиной 1,5 м; по контуру выработки в районе забоя формируется зона высоких концентраций горизонтальных сжимающих напряжений $\sigma_{\max 2}$ 87,5 МПа, глубиной до 2–4 м и более, действующих вкрест простирания выработки. При $\sigma_{\text{сж}}$ 130 МПа это крайне удароопасная ситуация;

- при условии оставления целика шириной 5–10 м между забоем выработки и нарушением ситуация аналогична представленному выше описанию;

- наиболее благоприятным сценарием является расстояние между забоем и нарушением, равное 17 м, а без глубины зоны наведенной трещиноватости 2 м остается 15 м устойчивого массива,

напряжения $\sigma_{\max 2}$ и $\sigma_{\max 3}$ при этом снижаются до допустимых пределов;

- максимальные растягивающие деформации $\varepsilon > 0,00035$ также в рассматриваемом сценарии являются отрицательным фактором;

- смещения незначительны из-за упругих свойств массива (скальная пластичность мало развита из-за свойств массива, что является отрицательным фактором в удароопасных условиях), но имеют такие же действия, как и растягивающие деформации;

- при проведении выработки на расстоянии 15 м от забоя до нарушения формируется зона высоких концентраций горизонтальных сжимающих напряжений $\sigma_{\max 2}$ 87,5 МПа по контуру забойной части выработки глубиной до 2 м, действующих вкрест простирания выработки, и $\sigma_{\max 1}$ 63,3 МПа, действующих по простиранию выработки;

- приближение забоя выработки к нарушению оказывает влияние в области ее кровли и до свода (формирование удароопасного участка во вмещающем массиве);

- максимальные растягивающие деформации $\varepsilon > 0,00035$ формируются в забое выработки на глубину до 1 м;

- смещения незначительны из-за упругих свойств массива (скальная пластичность мало развита из-за свойств массива, что является отрицательным фактором в удароопасных условиях), но имеют такие же действия, как и растягивающие деформации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резанов И. А. Образование гор. — М.: Наука, 1977. — 174 с.
2. Кузнецов В. А. Геотектоническое районирование Алтае-Саянской складчатой области // Вопросы геологии Азии. — М.: Изд-во АН СССР, 1954.
3. Язбутис Э. А. Таштагольско-Кочуринское рудное поле // Железорудные месторождения Алтае-Саянской горной области. Т. 1, Кн. 2: Описание месторождения. — М.: АН СССР, 1959. — С. 281–306.
4. Серяков В. М. Разработка алгоритмов решения задач теплопроводности для расчетов напряженного состояния массива с учетом последовательности ведения очистных и закладочных

- работ // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2022. — Т. 9. — № 3. — С. 54–59.
5. Курленя М. В., Еременко А. А., Шрепп Б. В. Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири. — Новосибирск: Наука, 2001. — 184 с.
 6. Лушников В. Н., Сэнди М. П., Еременко В. А., Коваленко А. А., Иванов И. А. Методика определения зоны распространения повреждения породного массива вокруг горных выработок и камер с помощью численного моделирования // Горный журнал. — 2013. — № 12. — С. 11–16.
 7. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Шевкунова Е. В., Гладышев Е. А. Эволюция сейсмичности Алтая после Чуйского землетрясения 2003 г. // Вулканология и сейсмология. — 2023. — № 6. — С. 26–40.
 8. Егоров П. В., Петров А. И., Егосин В. В. Предупреждение горных ударов на шахтах Кузбасса. — Кемерово, 1987. — 144 с.
 9. Конурин А. И., Еременко А. А., Филиппов В. Н. Особенности оценки состояния массива горных пород при промышленных взрывах и геодинамических явлениях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 7. — С. 153–160.
 10. Шрепп Б. В., Захарюта Г. В., Королев Н. Д. Особенности отработки новых рудных горизонтов с увеличением глубины на Таштагольском месторождении // Горный журнал. — 1975. — № 6. — С. 30–32.
 11. Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А. Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.
 12. Васичев С. Ю., Конурин А. И., Неверов С. А., Неверов А. А. Исследование показателей извлечения руды при системе подэтажного обрушения с торцовым выпуском на больших глубинах // Горный журнал. — 2023. — № 1. — С. 47–53.
 13. Журкина Д. С., Лавриков С. В. К вопросу определения макросвойств образцов геоматериалов при простом сдвиге в зависимости от микропараметров метода дискретных элементов // Динамические процессы в геосферах. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 1–10.
 14. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 542 с.
 15. Nazarova L. A., Nazarov L. A. Method for weak zones location at the coal-bed — host rock joint relative to the problem of sudden outbursts: theory and laboratory experiment // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2023, vol. 17, no. 63, pp. 13–25.
 16. Lavrikov S. V., Mikenina O. A. Stress concentration analysis in rock mass with regard to elastoplastic shears and local bends // *AIP Conference Proceedings*. 2023, vol. 2899, article 020088.
 17. Серяков В. М., Краснояский А. А. Напряженное состояние крепи и окрестности выработки при ведении подготовительных работ в неустойчивых горных породах // ФТПРПИ. — 2022. — № 6. — С. 43–52.
 18. Хан Г. Н. О несимметричном режиме разрушения массива горных пород в окрестности полости // Физическая мезомеханика. — 2008. — Т. 11. — № 1. — С. 109–114. **РИАБ**

REFERENCES

1. Rezanov I. A. *Obrazovanie gor* [Formation of mountains], Moscow, Nauka, 1977, 174 p.
2. Kuznetsov V. A. *Geotektonicheskoe rayonirovanie Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti. Voprosy geologii Azii* [Geotectonic zoning of the Altai-Sayan warehouse region. Issues of geology of Asia], Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1954.
3. Yazbutis E. A. *Tashtagol'sko-Kochurinskoe rudnoe pole. Zhelezorudnye mestorozhdeniya Altae-Sayanskoy gornoj oblasti*, vol. 1, Kn. 2: *Opisanie mestorozhdeniya* [Tashtagolsko-Kochurinskoe ore field. Iron ore mining of the Altai-Sayan mountain region. Vol. 1, book 2: Description of the field], Moscow, AN SSSR, 1959, pp. 281–306.]
4. Seryakov V. M. Development of algorithms for solving thermal conductivity problems for calculating the stressed state of the massif, taking into account the sequence of cleaning and stowing works. *Fundamental and applied issues of mining sciences*. 2022, vol. 9, no. 3, pp. 54–59. [In Russ].
5. Kurlenya M. V., Eremenko A. A., Shrepp B. V. *Geomekhanicheskie problemy razrabotki zhelezorudnykh mestorozhdeniy Sibiri* [Geomechanical problems of working iron ore deposits in Siberia], Novosibirsk, Nauka, 2001, 184 p.
6. Lushnikov V. N., Sandy M. P., Eremenko V. A., Kovalenko A. A., Ivanov I. A. Method of definition of the zone of rock mass failure range around mine workings and chambers by numerical modeling. *Gornyi Zhurnal*. 2013, no. 12, pp. 11–16. [In Russ].

7. Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., Shevkunova E. V., Gladyshev E. A. Evolution of the seismicity of Altai after the Chui earthquake of 2003. *Volcanology and seismology*. 2023, no. 6, pp. 26 – 40. [In Russ].

8. Egorov P. V., Petrov A. I., Egoshin V. V. *Preduprezhdenie gornyykh udarov na shakhtakh Kuzbassa* [Prevention of mountain strikes in the mines of Kuzbass], Kemerovo, 1987, 144 p.

9. Konurin A. I., Eremenko A. A., Filippov V. N. Assessment features for rock mass conditions under production blasting and geodynamic events. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 7, pp. 153 – 160. [In Russ].

10. Shrepp B. V., Zakharyuta G. V., Korolev N. D. Features of development of new ore horizons with increasing depth at the Tashtagolskoye deposit. *Gornyi Zhurnal*. 1975, no. 6, pp. 30 – 32. [In Russ].

11. Kurlenya M. V., Seryakov V. M., Eremenko A. A. *Tekhnogennyye geomekhanicheskiye polya napryazheniy* [Technogenic geomechanical stress fields], Novosibirsk, Nauka, 2005, 264 p.

12. Vasichev S. Yu., Konurin A. I., Neverov S. A., Neverov A. A. Study of ore extraction indicators in a sub-storey collapse system with end discharge at great depths. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 1, pp. 47 – 53. [In Russ].

13. Zhurkina D. S., Lavrikov S. V. On the issue of determining the macro properties of the images of geomaterials with simple shift depending on the microparameters of methodal discrete elements. *Dynamic processes in geospheres*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 1 – 10. [In Russ].

14. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [Finite element method in technology], Moscow, Mir, 1975, 542 p.

15. Nazarova L. A., Nazarov L. A. Method for weak zones location at the coal-bed – host rock joint relative to the problem of sudden outbursts: theory and laboratory experiment. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2023, vol. 17, no. 63, pp. 13 – 25.

16. Lavrikov S. V., Mikenina O. A. Stress concentration analysis in rock mass with regard to elastoplastic shears and local bends. *AIP Conference Proceedings*. 2023, vol. 2899, article 020088.

17. Seryakov V. M., Krasnovsky A. A. The stressed state of the support and the surroundings of the mine during preparatory work in unstable rocks. *Journal of Mining Sciences*. 2022, no. 6, pp. 43 – 52. [In Russ].

18. Khan G. N. On the asymmetric mode of destruction of the massif of rocks in the vicinity of the cavity. *Physical mesomechanics*. 2008, vol. 11, no. 1, pp. 109 – 114. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Еременко Андрей Андреевич — д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. РАН, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН, e-mail: yeryom@misd.ru, ORCID ID: 0000-0002-7342-7617,

Еременко Виталий Андреевич — д-р техн. наук, профессор РАН, директор научно-исследовательского центра «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии», профессор кафедры физических процессов, горного производства и геоконтроля Горного института НИТУ МИСИС, e-mail: prof.eremenko@gmail.com.

Для контактов: Еременко А.А., e-mail: yeryom@misd.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Eremenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia, e-mail: yeryom@misd.ru, ORCID ID: 0000-0002-7342-7617, V.A. Eremenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Russian Academy of Sciences, Director of the Scientific Research Center Applied Geomechanics and Convergent Mining Technologies, Professor of the Department of Physical Processes of Mining Production and Geocontrol of the Mining Institute of NUST MISIS, e-mail: prof.eremenko@gmail.com. **Corresponding author:** A.A. Eremenko, e-mail: yeryom@misd.ru.

Получена редакцией 18.02.2026; получена после рецензии 02.09.2026; принята к печати 20.09.2026.
Received by the editors 18.02.2026; received after the review 02.09.2026; accepted for printing 20.09.2026.