

УДК 622.273:65.011.12(088.8)  
DOI: 10.15587/2312-8372.2020.195946

## **РАЗРАБОТКА ПРИРОДООХРАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ РУД В ЭНЕРГОНАРУШЕННЫХ МАССИВАХ**

**Ляшенко В. И., Хоменко О. Е., Топольный Ф. Ф., Голик В. И.**

## **ROZROBKA ПРИРОДООХОРОННИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПІДЗЕМНОГО ВИДОБУТКУ РУД У ЕНЕРГОНАРУШЕННИХ МАСИВАХ**

**Ляшенко В. І., Хоменко О. Є., Топольний Ф. П., Голик В. І.**

## **DEVELOPMENT OF NATURAL UNDERGROUND ORE MINING TECHNOLOGIES IN ENERGY DISTRIBUTED MASSIFS**

**Lyashenko V., Khomenko O., Topolny F., Golik V.**

*Объектом исследования являются технология и технические средства для подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. Одним из самых проблемных мест является образование техногенных пустот, которые влияют на возникновение и перераспределение напряженно-деформационного состояния (НДС) массива горных пород. Их существование в земной коре провоцирует влияние геомеханических и сейсмических явлений, вплоть до уровня землетрясений.*

*В ходе исследования использовались:*

*– данные литературных источников и патентной документации в области технологий и технических средств для подземной добычи руд в энергонарушенных массивах, обоснования технологических параметров эксплуатационных блоков;*

*– лабораторные и производственные эксперименты;*

*– физическое моделирование и подбор составов твердеющих смесей.*

*Выполнены аналитические исследования, сравнительный анализ теоретических и практических результатов по стандартным и новым методикам с участием авторов.*

*Рассмотрены вопросы сейсмогеодинамического мониторинга НДС массива горных пород при безопасной разработке рудных месторождений скального типа. Показано взаимодействие природных и техногенных систем, обеспечивающих геомеханическую сбалансированность рудовмещающих массивов. Исследованы возможности управления геомеханикой массива с заполнением техногенных пустот разнопрочными смесями и хвостами подземного выщелачивания металлов из некондиционных руд. Дана типизация процессов и сформулированы отличительные признаки подземного блочного выщелачивания металлов из скальных руд в аспекте управления геодинамикой массива. Показана принципиальная оценка комбинированных технологий с рационализацией использования НДС горного массива для регулирования знака и величины напряжений в естественных и искусственных условиях. Сделаны*

выводы об эффективности управляемого взаимодействия природных и техногенных систем, обеспечивающих геомеханическую сбалансированность массивов и земной поверхности в районе освоения недр в течение долгого периода времени. Результаты исследований могут быть использованы при подземной разработке рудных месторождений сложной структуры Украины, Российской Федерации, Республики Казахстан и других развитых горнодобывающих стран мира.

**Ключевые слова:** напряженно-деформационное состояние, горный массив, подземная разработка, природоохранная технология, геомеханическая сбалансированность.

Об'єктом дослідження є технологія і технічні засоби для підземного видобутку руд в енергонарушених масивах. Одним із найбільш проблемних місць є утворення техногенних порожнеч, які впливають на виникнення і перерозподіл напряженно-деформаційного стану (НДС) масиву гірських порід. Їх існування в земній корі провокує вплив геомеханічних і сейсмічних явищ, аж до рівня землетрусів.

В ході дослідження використовувалися:

– дані літературних джерел і патентної документації в області технологій і технічних засобів для підземного видобутку руд в енергонарушених масивах, обґрунтування технологічних параметрів експлуатаційних блоків;

– лабораторні та виробничі експерименти;

– фізичне моделювання і підбір складів твердіючих сумішей.

Виконано аналітичні дослідження, порівняльний аналіз теоретичних і практичних результатів за стандартними і новими методиками за участю авторів.

Розглянуто питання сейсмогеодинамічного моніторингу НДС масиву гірських порід при безпечній розробці рудних родовищ скельного типу. Показано взаємодію природних і техногенних систем, що забезпечують геомеханічну збалансованість рудовміщуючих масивів. Досліджено можливості управління геомеханіки масиву із заповненням техногенних порожнеч різномісними сумішами і хвостами підземного вилуговування металів із некондиційних руд. Дана типізація процесів і сформульовані відмінні ознаки підземного блокового вилуговування металів із скельних руд в аспекті управління геодинамікою масиву. Показана принципова оцінка комбінованих технологій із раціоналізацією використання НДС гірського масиву для регулювання знаку і величини напружень в природних і штучних умовах. Зроблено висновки щодо ефективності керованої взаємодії природних і техногенних систем, що забезпечують геомеханічну збалансованість масивів і земної поверхні в районі освоєння надр протягом довгого періоду часу. Результати досліджень можуть бути використані при підземній розробці рудних родовищ складної структури України, Російської Федерації, Республіки Казахстан та інших розвинених гірничодобувних країн світу.

**Ключові слова:** напружено-деформаційний стан, гірський масив, підземна розробка, природоохоронна технологія, геомеханічна збалансованість.

## **1. Введение**

При техногенном вмешательстве в недра генеральным вопросом разработки рудных месторождений становится взаимодействие природных и технических систем, обеспечивающих геомеханическую сбалансированность массивов в районе освоения недр. При этом должна обеспечиваться возможность мониторинга напряженно-деформационного состояния (НДС) массива пород в течение долгого периода времени. Каждый горный объект имеет свое поле и реагирует на внешние воздействия [1, 2]. Под влиянием горных работ в верхних слоях литосферы выделяется зона, где сдвиги и деформации превышают допустимые значения [3, 4].

Поэтому исследование механизма возникновения и перераспределения факторов НДС массива горных пород для обеспечения жизнедеятельности населения, проживающего в зонах влияния горнодобывающих регионов – важная научная, практическая и социальная задача, требующая оперативного решения [5, 6].

## **2. Объект исследования и его технологический аудит**

*Объект исследования* – технология и технические средства для подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. Одним из самых проблемных мест является образование техногенных пустот, которые влияют на возникновение и перераспределение напряженно-деформационного состояния (НДС) массива горных пород. Их существование в земной коре провоцирует влияние геомеханических и сейсмических явлений, вплоть до уровня землетрясений.

## **3. Цель и задачи исследования**

*Цель исследования* □ разработка природоохранной технологии подземной добычи руд в энергонарушенных массивах сложной структуры на основе исследования механизма возникновения и перераспределения факторов напряженно-деформационного состояния массива горных пород. Это позволит обеспечить жизнедеятельность населения, проживающего в зоне влияния горнодобывающего региона.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

1. Установить, чем можно обеспечить сохранение земной поверхности от разрушения.
2. Определить зависимости для прогноза скорости колебаний горного массива от приведенной массы заряда на ступень замедления и условий взрывания для месторождений сложной структуры.
3. Рекомендовать новые природоохранные и ресурсосберегающие технологии и технические средства для подземной разработки рудных месторождений сложной структуры в энергонарушенных массивах.

## **4. Исследование существующих решений проблемы**

Горнодобывающие предприятия функционируют в условиях непосредственного контакта с промышленными зонами, жилыми агломерациями, природными объектами, в том числе и водными,

сельскохозяйственными угодьями, негативно воздействуя на них [7, 8]. Подземные горные работы под охраняемыми объектами при небольшой глубине разработки относятся к технологически сложным и опасным [9, 10]. Геодинамические процессы усиливаются со временем. Так, в недрах Садонских месторождений (Северный Кавказ, Республики Северная Осетия – Алания) за двухвековую историю разработки накоплено до 5 млн. м<sup>3</sup> незаполненных техногенных пустот. Такой объем пустот принимает участие в изменениях геодинамической и сейсмической обстановки в земной коре. Имеет право на существование гипотеза, что динамические процессы в их пустотах являются причиной катастрофических проявлений, например, схода ледника Колка в Кармадонском ущелье Северной Осетии и другое [11, 12].

Анализ техногенных пустот показывает, что с увеличением глубины разработки рудных месторождений и продолжительности существования камер количество самообрушений пород в них возрастает. Так, на шахте им. Фрунзе (Кривбасс, Украина) на глубине 0–100 м произошло одно обрушение, а на глубине 300–400 м их было уже двадцать пять. На шахте им. Коминтерна (Кривбасс, Украина) на глубине 300–400 м было восемь обрушений, а на глубине 600–700 м достигло тридцати пяти. Недооценка указанных факторов приводит к обрушению дневной поверхности на больших площадях, воздушных ударов в подземных выработках и социальной напряженности жителей, проживающих в зоне влияния горных работ. Это подтверждено во время обрушения дневной поверхности на площади 16 га шахты «Орджоникидзе» в Кривбассе (Украина) в 2010 году [13, 14]. Природо- и ресурсосберегающая технология погашения пустот твердеющей смесью характеризуется высокой затратностью и недостаточностью качества вяжущих материалов, так и заполнителей. Вовлечение в производство альтернативных компонентов смеси ограничиваются недостаточной их прочностью, транспортабельностью и затратностью.

Среди основных направлений решения этой проблемы, выявленных в научных ресурсах, могут быть выделены следующие гипотезы. Так, практикой отработки месторождений, локализованных в скальных массивах, доказано, что для управления их состоянием в большей мере применима известная теория, изложенная в работе [1]. В соответствии с этой теорией на выработку действует лишь масса пород, заключенных в пределах свода, высотой значительно меньшей глубины работ. В дальнейшем эта теория конкретизирована. В частности, автор работы [2] установил решающий параметр – сопротивление разрыву горных пород, образующих балку. А автор работы [3] увязал ее с устойчивостью слоя пород в кровле выработки. Автор же работы [4] определил устойчивое положение выработки как равенство между прочностью заклинивающихся пород, образующих шарнирную арку массивом в пределах свода естественного равновесия. Устойчивость массива обеспечивается при условии достаточной механической прочности нижнего ряда заклинивающихся структурных блоков, пригруженного массивом пород в пределах свода естественного равновесия. В последующем [5, 15] учеными определено, что сохранение земной поверхности от разрушения обеспечивается регулированием

уровня напряжений в разнопрочных участках, взаимоувязкой выемки руды во времени, пространстве и степени ее подготовленности к добыче. И на этой основе предложены новые природоохранные и ресурсосберегающие технологии и технические средства, которые дали положительные результаты при подземной разработке рудных месторождений Украины, Российской Федерации, Казахстана и других развитых горнодобывающих стран мира.

Таким образом, результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что важным для решения вопросом является образование техногенных пустот, которые влияют на возникновение и перераспределение НДС массива горных пород. Их существование в земной коре провоцирует влияние геомеханических и сейсмических явлений, вплоть до уровня землетрясений.

## **5. Методы исследований**

В ходе исследования использованы методы комплексного обобщения, анализа и оценки практического опыта и научных достижений в области:

- технологии и технических средств подземной добычи руд в энергонарушенных массивах сложной структуры;
- подземной геотехнологии;
- теории и практики взрывного разрушения твердых сред.

Также были использованы методы механики сплошных сред, математической статистики и методы исследования волновых процессов по стандартным и новым методикам ведущих специалистов развитых горнодобывающих стран мира с участием авторов.

## **6. Результаты исследования**

### **6.1. Модель природно-техногенных напряжений горных массивов**

Модели, которые бы удовлетворительно описывали механизм геомеханических процессов и наведенной сейсмичности, не существуют. Состояние породных массивов в процессе добычи руд корректируется явлением релаксации. Перевод массива в гарантировано устойчивое или неустойчивое состояние и ограничение конвергенции контуров выработки обеспечивается посредством оптимизации несущей способности техногенных сооружений путем сопоставления силы техногенных процессов с геологическими процессами в естественных условиях и оптимизации коэффициента надежности.

Снижение уровня напряжений до безопасной величины обеспечивается инженерными мероприятиями, которые способствуют сдвигению пород без разрушения их целостности [16]. Условие прочности природно-техногенной системы описывается моделью Ветрова-Голика [4, 8, 9]:

$$\sigma_1 \pm k\sigma_{2,3} \leq \sigma_{сж} = \begin{cases} \sigma_{сж}^0 = \int_0^{Z_0 \max} f(x)(dx_1, dx_2 \dots dx_n) \rightarrow \begin{cases} \sigma_{закл} = \int_0^{Z_0 \max} f(x)(dH_S), \\ \sigma_{закл} = \int_0^{Z_0 \max} f(x)(dH_S + dH_C), \end{cases} \\ \sigma_{сж}^{ост} \text{ при } H_C = H \rightarrow \sigma_{закл} = \int_0^B f(x)(dH), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\sigma_1, \sigma_{2,3}$  – соответственно, горизонтальные и вертикальные (по осям  $x$  и  $z$ ) главные напряжения, МПа;

$k$  – коэффициент геологических условий, ед.;

$\sigma_{сж}$  – напряжения в верхнем слое вмещающих пород, МПа;

$\sigma^0$  – напряжения в окрестностях выработки, МПа;

$\sigma_{сж}^{ост}$  – остаточная прочность пород, МПа;

$Z_0$  – плоский пролет пород кровли, м;

$x_1, \dots, x_n$  – характеристики пород, ед.;

$\sigma_{закл}$  – прочность закладочного массива, МПа;

$B$  – пролет зоны обрушения, м;

$H, h_c$  – соответственно, высота зоны обрушения и влияния выработки, м;

$h_S$  – высота закладочного массива, м.

Состояние массивов описывается условием Гука:

$$\sigma_x = T_y \cdot \epsilon_x; \quad \sigma_y = T_n \cdot \epsilon_y, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – главные напряжения, МПа;  $\epsilon$  – деформации;  $T_y$  и  $T_n$  – эффективные тензоры, соответственно, упругости и податливости;  $\Delta$  – коэффициент дискретности.

В массиве образуются зоны трещиноватости, характеризующиеся ослаблением пород. В зоне нарушенных пород мощностью от 0,5 до 10 м коэффициент ослабления снижается от 0,25 до 1,15. Зона повышенной ослабленности имеет мощность 0,5–1,5 м. Коэффициент структурного ослабления увеличивается к периферии до 0,15. Это означает уменьшение прочности в сравнении с ненарушенным массивом от 1,5 до 6,0 раз.

## 6.2. Использование остаточной прочности нарушенных пород

Напряжения в нарушенном массиве определяются способностью структурных блоков к самозаклиниванию за счет остаточной прочности пород и описывается моделью вида:

$$\sigma_{p.m} = f(\sigma^{ост}, d_1, d_2, R_{сж}, H, h_{св}, \dots, x_n) = \int_{\min}^{\max} f(x_1, \dots, x_n), \quad \rightarrow \quad (3)$$

где  $\sigma^{ост}$  – остаточная прочность пород, МПа;  $X_n$  – параметры закладки и массива, МПа.

Параметры предельного свода самозаклинивания структурных блоков пород описывается моделью вида:

$$\alpha = d_I \left( \frac{10 R'_{сж}}{KH V_c} - 1 \right) \Rightarrow [\sigma]_{крит} < [\sigma]_{р.н}^{ост}, \quad \rightarrow \quad (4)$$

где  $\alpha$  – полупролет предельного свода заклинивания, м; 10 – коэффициент перевода, кг/см<sup>2</sup> в т/м<sup>2</sup>;  $V_c$  – масса пород, т/м<sup>2</sup>;  $H$  – глубина расположения пят свода, м;  $K$  – коэффициент запаса прочности.

Сохранность массива обеспечивается разделением его на участки, где прочность определяется напряжением пород не в массиве до поверхности, а лишь в нижнем его слое, высота которого зависит от ширины плоского пролета подработки массива. При неполном обеспечении этого условия пустоты закладываются. Сейсмически безопасная технология регламентируется ограничениями:

- сейсмозрывные сотрясения не превышают допустимые пределы скорости смещения для объектов от 1,0 до 3,0 см/с;
- экранирование сейсмозрывных волн;
- ограничение массы заряда взрывчатого вещества (ВВ) на одно замедление величиной 1500 кг;
- ограничение количества одновременно взрывааемых эксплуатационных блоков двумя;
- применение интервала замедления между взрывами не менее 50 м·с.

### **6.3. Модель управления геомеханикой горных массивов закладкой твердеющими смесями различной прочности**

Геомеханическая сбалансированность массивов в районе освоения недр обеспечивается замещением извлекаемых руд искусственным массивом [17]. Степень деформирования природно-техногенных конструкций и земной поверхности под влиянием горных работ оценивали путем моделирования способов погашения техногенных пустот методом фото-упругости. Месторождение Северного Казахстана размерами по простиранию 2500 м, по восстанию 500 м и мощностью 10 м·с масштабом 1:20000 идентифицировали моделью 125×25×5 см. Объемный вес эпоксимала 1,2 г/см<sup>3</sup>, модуль упругости – 2,7 МПа. Массив принимали однородным, нарушенным геологическим разломом, и крупной тектонической трещиной, что соответствует условиям рудных месторождений. В первой серии моделей пустоты оставили открытыми, во второй – заполнили дискретными породами, в третьей – твердеющей смесью малой прочности (до 2,5 МПа), а в четвертой – заполнили прочной (свыше 2,5 МПа) твердеющей смесью. По измеренным главным напряжениям строили эпюры напряжений вокруг выработки, что было основанием для оценки

ослабленности массива под влиянием горных работ. Установлено, что распределение главных напряжений при всем разбросе значений подчиняется общей закономерности и кривые графика по форме близки. В районе эксплуатационных блоков были пробурены скважины, ориентированные относительно сланцеватости пород и направления отработки. В скважинах устанавливали датчики смещения стенок скважин, показания которых регистрировали тензометрической аппаратурой [18].

Величина главных напряжений в массиве изменяется от 1,0 до 9,2 МПа в зависимости от состояния техногенных пустот и места их измерения (табл. 1).

**Таблица 1**

Величина главных напряжений при моделировании, МПа

Главные напряжения в массиве	Без заполнения	С заполнением		
		Дискретная смесь	Малопрочная смесь	Прочная смесь
Висячий бок				
$\sigma_x$	8,9	5,4	5,0	3,8
$\sigma_y$	7,8	5,0	4,4	3,2
Лежачий бок				
$\sigma_x$	7,7	4,8	4,8	3,6
$\sigma_y$	6,9	4,7	4,7	3,0

Условие устойчивости описывается моделью вида:

$$\sigma_1 - \sigma_2 \geq \sin \delta (\sigma_1 + \sigma_2) + \sigma_{сж} + (1 - \sin \delta), \quad \rightarrow \quad (5)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  – соответственно, горизонтальные и вертикальные главные напряжения, МПа;  $\delta$  – угол внутреннего трения, градус;  $\sigma_{сж}$  – прочность пород на сжатие, МПа.

Напряжение в массиве описывается моделью вида:

$$G_n = \gamma \cdot H \cdot \frac{G_m}{\sigma_b}, \quad \rightarrow \quad (6)$$

где  $\gamma$  – плотность пород, т/м<sup>3</sup>;  $H$  – глубина нахождения измеряемой точки, м;  $\sigma_b$  – напряжение в модели, МПа.

При боковом распоре  $\lambda$  от 0,5 до 1,5, угле наклона силового вектора к вертикальной оси  $\alpha=0$ , модуле закладки 0,1 МПа, модуле вмещающих пород – 1,4 МПа, напряжения в модели примут вид:

$$\sigma_m = \sigma^{1.0} \cdot n, \quad (7)$$

где  $\sigma^{1.0}=0,1$  кгс/см<sup>2</sup> на одну полосу;  $n$  – номер полосы в точке модели.

Варианты состояния очистных камер: без закладки и с закладкой. При коэффициенте бокового распора  $\lambda=0,5$  максимальные главные напряжения в

зонах замков свода и стенках камер равны  $7,6 \cdot 7,5 = 57$  МПа, а вершине свода потолочины  $7,6 \cdot 2,0 = 15,2$  МПа. В междукамерном целике максимальные сжимающие главные напряжения составили  $7,6 \cdot 6,5 = 49$  МПа. При коэффициенте бокового распора  $\lambda = 1,0$  в зонах замков свода, потолочине и стенках камеры главные напряжения составляют:  $7,6 \cdot 6,5 = 49$  МПа. В целике максимальные главные напряжения снижаются:  $7,6 \cdot 5,5 = 42$  МПа. При коэффициенте бокового распора  $\lambda = 1,5$  в зонах замков свода потолочины и стенки камеры главные напряжения составляют  $7,6 \cdot 6,5 = 49$  МПа, а в своде потолочины до  $7,6 \cdot 8,5 = 64$  МПа против 15 при коэффициенте бокового распоре 0,5. При изменении коэффициента бокового распора от 0,5 до 1,5 напряжения в потолочине увеличились от 41 до 140 МПа. Закладка камер твердеющими смесями снижает уровень главных напряжений в потолочине примерно в 2 раза. При вариантах без закладки в междукамерных целиках величина главных напряжений увеличивается. Результаты моделирования сводятся к следующему:

- при закладке пустот твердеющими смесями без разгрузки главных напряжений оседание кровли достигает 105 мм в пересчете на натуру;
- при закладке пустот твердеющими смесями меньшие главные напряжения возникают при одностадийном порядке отработки с разгрузкой массива выемкой руд;
- главные напряжения при разгрузке по кровле и почве различаются на 20–30 %, но разгрузка по почве предпочтительнее. Искусственный целик сохраняет устойчивость, пока главные напряжения на фронте волны не превысят предела прочности закладочного материала [19].

#### 6.4. Технологии реализации модели

Модель взаимодействия природных и технических систем основана на замещении породного массива массивом затвердевших твердеющих смесей, прочность которого сравнима или несколько ниже породного. Разгрузка массива от опасных главных напряжений осуществляется разработкой по кровле выработки или подработкой по почве. Сохранность массива и участка земной поверхности над ним оценивается сопоставлением размеров зоны опасного влияния выработок с глубиной работ. Зависимость показателей качества разработки месторождения от параметров геомеханических процессов описывается моделью вида:

$$\sigma \cdot K_3 = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} f(x) (d x_1, d x_2, \dots, d x_n) \rightarrow \Pi, R = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} f \cdot x (d h_3 + d h_n), \quad (8)$$

где  $\sigma$  – главные напряжения в зоне влияния выработок, МПа;

$K_3$  – коэффициент корректировки напряжений;

$l_{\max}, l_{\min}$  – соответственно, максимальные и минимальные пролеты обнажения пород, м;

$x_1...x_n$  – технологические, физико-механические и иные характеристики горных пород;

$P, R$  – соответственно, потери и разубоживание руд, доли ед.;

$h_3, h_n$  – соответственно, высота зоны влияния горных выработок и закладочного массива, м.

Нарушенные породы в пределах образующегося свода могут образовать прочную конструкцию [20]:

$$\alpha = d_1 \left( \frac{10 R_{сж}}{KH\gamma} - 1 \right), \quad \rightarrow \quad \rightarrow \quad (9)$$

где  $a$  – полупролет свода заклинивания пород в кровле выработки, м;

$d_1$  – горизонтальный размер структурного блока пород, м;

$R_{сж}$  – сопротивление пород объемному сжатию, кг/см<sup>2</sup>;

10 – коэффициент перевода кг/см<sup>2</sup> в т/м<sup>2</sup>;

$\square$  – объемный вес пород, кг/м<sup>3</sup>;

$H$  – глубина расположения пяты свода заклинивания пород в кровле выработки, м;

$K$  – коэффициент запаса прочности, ед.

Подпор пород закладкой обеспечивает условия объемного сжатия для повышения его прочности в 1,2–1,4 раза. Защита закладочного массива от сейсмического действия взрыва производится экранированием. Зависимость скорости колебаний пород от веса заряда ВВ, полученная экспериментально и расчетом, обладают хорошей сходимостью (рис. 1). Характер зависимости колебаний частиц пород на фронте сейсмических волн от расстояния до центра взрыва интерпретируется рис. 2.

### **6.5. Управление геомеханикой горных массивов при подземном выщелачивании металлов**

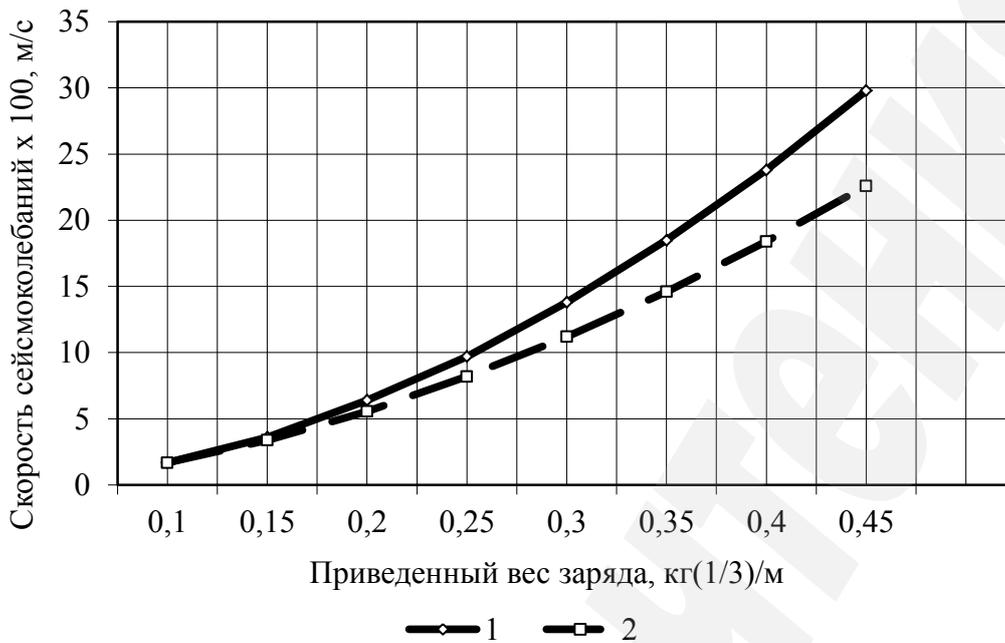
Разработка подземным выщелачиванием металлов из руд скальных месторождений отличается от традиционной технологии:

– заполнением пустот отделенной от массива горной массой, участвующей в сохранении геомеханической стабильности;

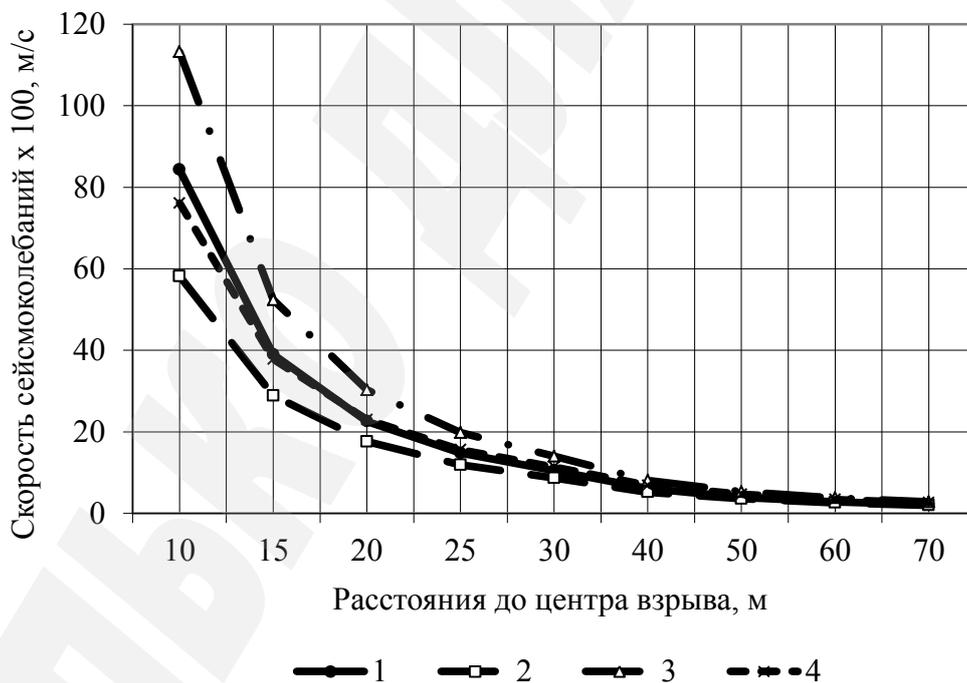
– выдачей на земную поверхность только части горной массы (до 30 %) для обеспечения компенсационного пространства при отбойке и магазинирования руд;

– извлечением металлов из руд в специальных технологических установках, размещенных в подземных выработках.

Устойчивость рудовмещающего массива определяется наличием свода естественного равновесия описывается моделью вида:



**Рис. 1.** Зависимость скорости сейсмических колебаний массива горных пород от веса одновременно взрывающего заряда взрывчатых веществ: 1 – на основе корреляционного анализа и обработки экспериментальных данных; 2 – расчетная



**Рис. 2.** Зависимость скорости сейсмических колебаний массива горных пород от веса одновременно взрывающего заряда взрывчатых веществ (ВВ) и расстояния до эпицентра взрыва для условий двух рудников: 1, 2 – при весе ВВ, равном 500 кг; 3, 4 – при весе ВВ, равном 800 кг

$$L_{пред} = 2d_2 \sqrt{\frac{10R_{сж}}{\kappa_2 \gamma d_1}}, \quad (10)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – соответственно, горизонтальный и вертикальный размеры структурных блоков, м;  $\gamma$  – объемный вес пород, кг/м<sup>3</sup>;  $K_2$  – коэффициент запаса прочности.

Если кровлю слагают породы, деформации в которых не превышают границ пластических, допустимый пролет плоской формы основной кровли описывается моделью вида:

$$L_0 = 1,71 \sqrt[3]{\frac{10R_{сж} \cdot d_{ос}^2}{K_2\gamma}} \quad \rightarrow \quad \rightarrow \quad \rightarrow \quad (11)$$

Если в кровле находится часть рудопроводящего шва, способность к самозаклиниванию снижается, и допустимый пролет непосредственной кровли плоской формы описывается моделью вида:

$$L = 1,48 d n_2 \sqrt[3]{\frac{10R_{сж}}{K_2\gamma v}} \quad \rightarrow \quad \rightarrow \quad \rightarrow \quad (12)$$

Плоский пролет может быть увеличен скреплением структурных блоков, например анкерной крепью за счет увеличения момента силы распора описывается моделью вида:

$$L_3 = 2,98 d n_2 \sqrt{\frac{10R_{сж}}{K_2\gamma v}} \quad \rightarrow \quad \rightarrow \quad \rightarrow \quad (13)$$

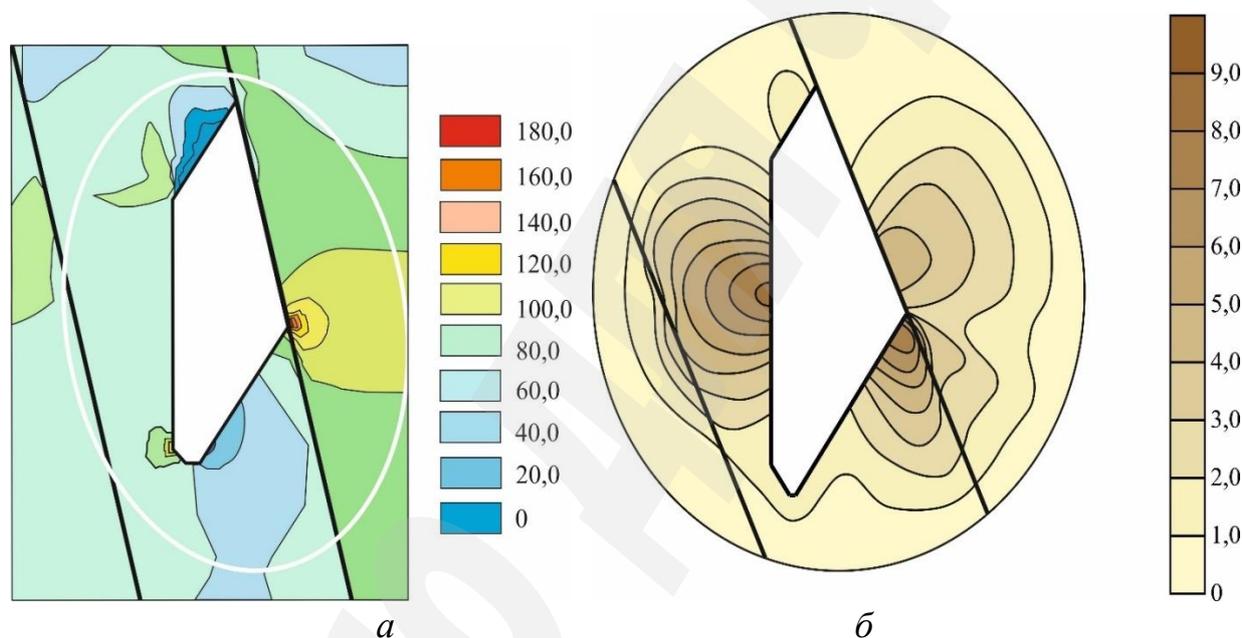
При двухстадийной отработке опорное давление перераспределяется на камеры второй очереди, а нагрузка на конструкции определяется массой пород внутри возникшего естественного равновесия пород. Нарушенные породы в пределах свода деформируются, но могут образовать прочную конструкцию и не препятствовать процессу добычи руды [21].

## 6.6. Результаты внедрения

В результате проведения комплекса научно-исследовательских работ авторами установлен современный технический уровень применяемой системы разработки, стандартизированы ее элементы и основные технологические процессы. Составлен комплект стандартов предприятия «Система разработки поэтажными штреками (ортами) с закладкой выработанного пространства твердеющей смесью. Параметры и размеры». Данный комплект стандартов регламентирует (в зависимости от горно-геологических условий) длину, ширину и высоту камер первой, второй и третьей очередей выемки, их предельно допустимые значения. При этом учитываются изменения прочностных свойств закладки при ее твердении и глубины разработки, высота подэтажа и днища блока, расстояние между выпускными погрузочно-доставочными выработками (дучками). Они зависят от мощности рудного тела и высоты этажа, формы и размеров поперечных сечений основных блоковых

выработок. Технологические параметры системы разработки: применяемое оборудование, способ и механизация выпуска руды, порядок отработки и отбойки камерных запасов, расположение и диаметр буровых скважин – определены также в зависимости от ранее стандартизированных параметров и размеров камер. Настоящий комплект стандартов внедрен на рудных шахтах Украины, Республике Казахстан, Российской Федерации при подземной разработке рудных месторождений сложной структуры и успешно используется специалистами технологических и геолого-маркшейдерских служб [22].

Моделирование состояния массива вокруг очистных выработок для условий эксплуатационных блоков на шахтах ОАО «Криворожский ЖРК» (г. Кривой Рог, Украина) выполнялось с помощью современных программных продуктов. При исследовании состояния массива с помощью метода конечных элементов на контуре выработок получали стремящиеся к нулю нормальные и максимальные касательные напряжения (рис. 3).

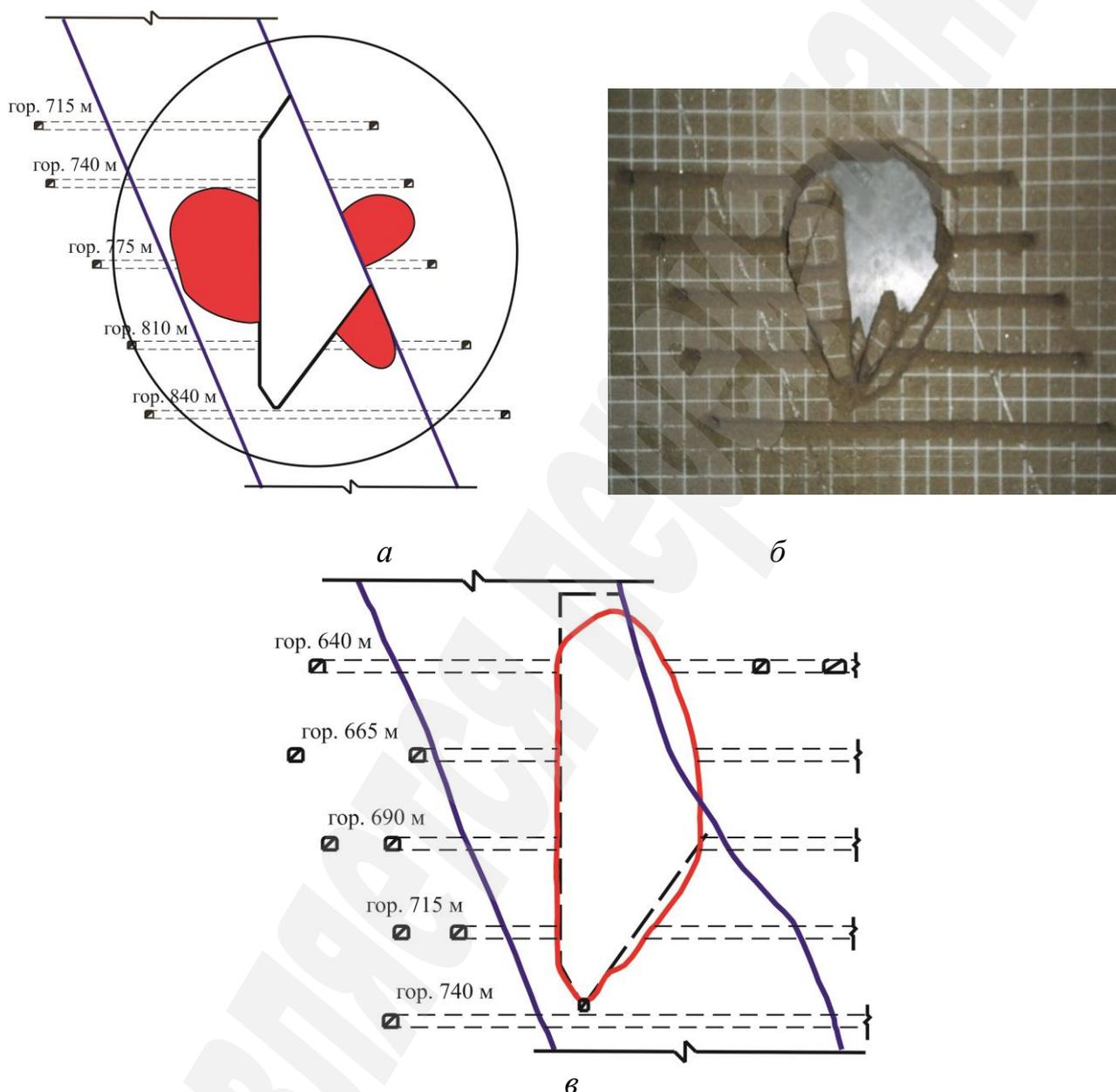


**Рис. 3.** Развитие напряженно-деформированного состояния и формирование зон разгрузки и концентрации напряжений вокруг очистной камеры на глубине 1000 м, смоделированных: *а* – методом конечных элементов – (кН/м<sup>2</sup>) и *б* – термодинамическим методом (МПа)

На шкалах рис. 3 обозначены механические нормальные напряжения. Для конструктивных элементов эксплуатационных блоков на этих шахтах ОАО предложена эллипсоидная форма, исключая самообрушения руды, пород и предусматривающая заполнение очистного пространства закладочным материалом.

В результате проведения теоретических, лабораторных и промышленных исследований была разработана методика расчета рациональных параметров подготовки эксплуатационных блоков на шахте «Проходческая» Частного акционерного общества «Запорожский железорудный комбинат» (ЧАО

«ЗЖРК») (г. Днепрорудное, Украина). Сущность методики состоит в том, что заложение подготовительных выработок рационально выполнять в местах со сходной или максимально пониженной энергонасыщенностью пород. Заложение выработок по границам линий, оконтуривающим энергетические зоны, дает возможность проводить их без крепления. При этом на трассы заложения выработок висячего бока влияют первичные камеры, а выработок лежачего бока – вторичные (рис. 4) [23].



**Рис. 4.** Результаты исследований эффективности способа подготовки блоков на шахтах ЧАО «Запорожский ЖРК»: *а* – теоретические; *б* – лабораторные; *в* – промышленные

### 6.7. Перспективы развития исследований

Полученные результаты не исчерпывают проблему природо- и ресурсосбережения, охраны окружающей среды и человека. Развитие методических основ оптимизации горной технологии должно привести к:

- созданию соответствующей подсистемы автоматизации проектирования и планирования горных работ;
- повышению технологической и экологической безопасности окружающей среды;
- рациональному использованию и охране недр;
- безопасности жизнедеятельности человека в зоне влияния горных работ [24, 25].

Таким образом, наведенные геомеханические процессы корреспондируют с естественными геодинамическими процессами, следствием чего является нарушение равновесия в земной коре. Управление массивом путем регулирования природных и техногенных напряжений позволяет повысить безопасность работ, снизить разубоживание руды и улучшить показатели обогащения добытых руд. Опасность усиления напряжений проявляется при наложении сейсмичности взрывных работ на рудовмещающий дискретный массив и прилегающий участок земной поверхности. Наибольшую опасность представляет разрушение массива при взрывании большого объема взрывчатых веществ. Взаимодействие природных и технических систем, обеспечивающих геомеханическую сбалансированность массивов и земной поверхности в районе освоения недр с возможностью мониторинга НДС массива пород в течение долгого периода времени и управляется регламентацией режимов добычи руд.

#### **6.8. Направление дальнейших исследований**

Проведя анализ методик, технологий и технических средств определения прочности горных пород авторами расширена классификация методов исследования за счет введения синергетической группы. Это существенно позволило исследовать явление зонального структурирования массива вокруг горных выработок. Авторы отмечают, что весьма важным является также изучение зависимостей количества, размеров и форм энергетических зон. На этой основе более точно выявить затухающие напряжения и кольцевые области деформации и производить выбор эффективного крепления горно-подготовительных и капитальных выработок, а также производства горных работ [26].

#### **7. SWOT-анализ результатов исследований**

*Strengths.* На основе исследования механизма возникновения и перераспределения НДС массива пород предложена природоохранная технология подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. Она позволяет обеспечить жизнедеятельность населения, проживающего в зоне влияния горных объектов (шахты, отвалы пустых пород и забалансовых, по содержанию полезного компонента, руд, промышленные площадки для закладочных комплексов, предконцентрации и кучного выщелачивания металлов из некондиционного рудного сырья, хвостохранилищ и др.).

*Weaknesses.* Основным отрицательным влиянием горной технологии на окружающую природную среду и человека являются большие затраты на обеспечение жизнедеятельности населения, проживающего в зоне влияния

горных объектов, вывод больших площадей земель из пользования и др. Поэтому необходимо предусматривать средства на проведение следующих мероприятий:

- глубинная переработка техногенных отходов (хвостов), обладающих большим разнообразием минеральных форм по сравнению с обычными рудами;
- рекультивация территории промышленных площадок и близлежащей к ним территории после окончания эксплуатации;
- озеленение рекультивированной территории травяной и кустарниковой растительностью;
- постоянный мониторинг компонентов окружающей среды в зоне влияния горных объектов.

*Opportunities.* Для переработки техногенных отходов (хвостов), обладающих большим разнообразием минеральных форм по сравнению с обычными рудами, требуется создавать новые технологии, основанные на последних достижениях науки и техники. Необходимо проводить интенсивные исследования, направленные на решение проблемы утилизации накопленных отходов горно-металлургического производства (ГМП). Реализация эффективных методов извлечения металлов из таких отходов позволит улучшить экологическую обстановку в районах их складирования и обеспечит прирост минерально-сырьевой базы горнодобывающей промышленности. Широкое вовлечение в производство техногенных запасов хвостов обогащения руд, а также переработка отвалов забалансовых, по содержанию полезных компонентов, руд на модульных установках способствуют получению дополнительного источника удовлетворения потребности промышленности в металлах. А также снижению загрязнения окружающей среды в развитых горнодобывающих странах мира [27].

*Threats.* Отдельно следует отметить необходимость создания защитных лесополос вдоль транспортных путей (автомобильных, железнодорожных, пульпопроводов и др.). Территории, где предельно-допустимая концентрация (ПДК) загрязнений превышена, необходимо перевести под посев технических культур, в водоемах – запретить вылов рыбы, купание и др. С целью предотвращения пылевого переноса загрязненного материала за пределы горных объектов, санитарно-защитные зоны и полосы вокруг них целесообразно засаживать высокорослыми древесными породами, которые будут сдерживать скорость ветра над указанными объектами. К ним относятся шахты, отвалы пустых пород и забалансовых, по содержанию полезного компонента, руд, закладочные комплексы, площадки предконцентрации и кучного выщелачивания металлов из некондиционного рудного сырья, хвостохранилища и др. При этом пыль будет оседать в этих лесных насаждениях и не будет поступать на другие территории, в том числе и в населённые пункты. Кроме того, нужно разработать научно-методические основы, технологии и технические средства для повышения плодородности и эффективности использования почв промышленных зон горных объектов, а также дать оценку их влияния на окружающую среду и человека [28].

## **8. Выводы**

1. Установлено, что сохранение земной поверхности от разрушения обеспечивается регулированием уровня напряжений в разнопрочных участках, взаимоувязкой выемки руды во времени, пространстве, степени ее подготовленности к добыче. Так, в зоне нарушенных пород мощностью от 0,5 до 10 м коэффициент ослабления снижается от 0,25 до 1,15. Зона повышенной ослабленности имеет мощность 0,5–1,5 м. Коэффициент структурного ослабления увеличивается к периферии до 0,15, что означает уменьшение прочности в сравнении с ненарушенным массивом от 1,5 до 6,0 раз.

2. Определена эмпирическая зависимость для прогноза скорости колебаний горного массива от приведенной массы заряда на ступень замедления и условий взрывания для месторождений сложной структуры вида  $y=a \cdot b$  ( $a$  и  $b$  – коэффициенты, зависящие от сейсмоакустических свойств горного массива и условий взрывания). В частности, подпор пород закладкой обеспечивает условия объемного сжатия для повышения его прочности в 1,2–1,4 раза.

3. Рекомендованные в работе новые природоохранные и ресурсосберегающие технологии и технические средства дали положительные результаты также при подземной разработке рудных месторождений сложной структуры:

– Украины: ГП «ВостГОК» (г. Желтые Воды), Кривбасс (г. Кривой Рог), ЧАО «ЗЖРК» (г. Днепрорудное);

– Российской Федерации, ПАО «ППГХО», предприятие Уранового холдинга «АРМЗ» (г. Краснокаменск), Садонский свинцово-цинковый комбинат (п. Мизур, Северный Кавказ, РСО–Алания);

– Республики Казахстан, АО «Целинный горно–химический комбинат» (г. Степногорск).

## **Благодарность**

В организации создания, совершенствования и внедрения научных разработок принимали участие и оказывали содействие специалисты:

– Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии» (ГП «УкрНИПИИпромтехнологии») и Государственное предприятие «Восточный горно-обогатительный комбинат» (ГП «ВостГОК»), г. Желтые Воды, Украина;

– Акционерные общества «ВНИПИпромтехнологии» и «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Россия;

– Казенное предприятие «Кировгеология», г. Киев, Украина;

– Национальный технический университет «Днепровская политехника» и Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), г. Днепр, Украина;

– Государственное высшее учебное заведение «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог, Украина.

## Литература

1. Protodiakonov, M. M. (1933). *Davlenie gornykh porod i rudnichnoe kreplenie. Ch. 1: Davlenie gornykh porod*. Moscow: Izd. GNTGI, 128.
2. Slesarev, V. D. (1948). *Opredelenie optimalnykh razmerov celikov razlichnogo naznacheniiia*. Moscow: Ugletekhizdat, 57.
3. Vetrov, S. V. (1975). *Dopustimye razmery obnazhenii gornykh porod pri podzemnoi razrabotke rud*. Moscow: Nauka, 223.
4. Borisov, A. A. (1980). *Mekhanika gornykh porod*. Moscow: Nedra, 359.
5. Fisenko, G. L. (1980). *Predelnoe sostoianie gornykh porod vokrug vyrabotok*. Moscow: Nedra, 359.
6. Slepcev, M. N., Azimov, R. Sh., Mosinec, V. N. (1986). *Podzemnaia razrabotka mestorozhdenii cvetnykh i redkikh metallov*. Moscow: Nedra, 206.
7. Chernova, A. P. (Ed.) (2001). *Dobycha i pererabotka uranovykh rud*. Kyiv: «Adef-Ukraina», 238.
8. Liashenko, V. I., Golik, V. I. (2006). Prirodookhrannye tekhnologii podzemnoi razrabotki uranovykh mestorozhdenii. *Gornii zhurnal*, 2, 89–92.
9. Liashenko, V. I., Golik, V. I. (2008). Tekhnologii upravleniia neodnorodnymi skalnymi massivami uranovykh mestorozhdenii pri podrabotke. *Naukovii visnik NGU*, 8, 37–47.
10. Bariakh, A. A. (2010). Geomekhanika: sintez teorii i eksperimenta. Strategiiia i processy osvoeniia georesursov. *Materialy sessii Gornogo instituta UrO RAN*. Perm: Gornii in-t Ur O RAN, 78–79.
11. Bondarenko, V., Kovalevs'Ka, I., Svystun, R., Cherednichenko, Y. (2013). Optimal parameters of wall bolts computation in the united bearing system of extraction workings frame-bolt support. *Mining of Mineral Deposits*, 5–10. doi: <http://doi.org/10.1201/b16354-2>
12. Golik, V. I., Komashchenko, V. I., Morkun, B. C., Liashenko, V. I. (2015). Povyshenie polnoty ispolzovaniia neдр s uchetom napriazhenii pri kombinirovannoi razrabotke mestorozhdenii. *Girnichii visnik*, 100, 68–74.
13. Dmitrak, Iu. V., Kamnev, E. N. (2016). AO «Veduschii proektno-izyskatelskii i nauchno-issledovatel'skii institut promyshlennoi tekhnologii» – Put dlinoi v 65 let. *Gornii zhurnal*, 3, 6–12.
14. Kuzmin, Iu. O., Zhukov, V. C. (2012). *Sovremennaia geodinamika i variacii fizicheskikh svoistv gornykh porod*. Moscow: Gornaia kniga, 264.
15. Burdzieva, O. G., Zaalishvili, V. B., Beriev, O. G., Kanukov, A. S., Maisuradze, M. V. (2016). Mining impact on environment on the north ossetian territory. *International Journal of Geomate*, 10 (1), 1693–1697. doi: <http://doi.org/10.21660/2016.19.5327>
16. Bucher, R., Cala, M., Zimmermann, A., Balg, C., Roth, A. (2013). Large scale field tests of hightensile steel wire mesh in combination with dynamic rock bolts subjected to rock burst loading. *7th Int. Symp. on Ground Support in Mining and Underground construction*. Perth, 56–65. doi: [http://doi.org/10.36487/acg\\_rep/1304\\_14\\_bucher](http://doi.org/10.36487/acg_rep/1304_14_bucher)
17. Haeri, H., Shahriar, K., Marji, M. F., Moarefvand, P. (2014). Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in pre-cracked rock-like

disks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67, 20–28. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.01.008>

18. Stefanov, Y. P., Chertov, M. A., Aidagulov, G. R., Myasnikov, A. V. (2011). Dynamics of inelastic deformation of porous rocks and formation of localized compaction zones studied by numerical modeling. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59 (11), 2323–2340. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jmps.2011.08.002>

19. Zaalishvili, V. B., Mel'kov, D. A. (2014). Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 50 (5), 707–718. doi: <http://doi.org/10.1134/s1069351314050097>

20. Komashenko, V. I. (2016). Razrabotka vzryvnoi tekhnologii, snizhaischei vrednoe vozdeistvie na okruzhaiuschuiu sredu. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 1, 34–43.

21. Lyashenko, V. I., Golik, V. I. (2017). Scientific and engineering supervision of uranium production development. Achievements and challenges. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 7, 137–152. doi: <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-7-0-137-152>

22. Kaplunov, D. R., Radchenko, D. N. (2017). Principy proektirovaniia i vybor tekhnologii osvoeniia neдр, obespechivaiuschikh ustoichivoe razvitie podzemnykh rudnikov. *Gornii zhurnal*, 11, 121–125.

23. Khomenko, O. E., Kononenko, M. N., Lyashenko, V. I. (2018). Safety Improving of Mine Preparation Works at the Ore Mines. *Occupational Safety in Industry*, 5, 53–59. doi: <http://doi.org/10.24000/0409-2961-2018-5-53-59>

24. Rudmin, M. A., Mazurov, A. K., Reva, I. V., Steblecov, M. D. (2018). Perspektivy kompleksnogo osvoeniia Bakcharskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniia (Zapadnaia Sibir, Rossiia). *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 10, 87–99.

25. Mukhametshin, V. V., Andreev, V. E. (2018). Povyshenie effektivnosti oцenki rezultativnosti tekhnologii, napravlennykh na rasshirenie ispolzovaniia resursnoi bazy mestorozhdenii s trudnoizvlekaemymi zapasami. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 329 (8), 30–36.

26. Khomenko, O. E., Lyashenko, V. I. (2019). Improvement of the Mine Technical Safety for the Underground Workings. *Occupational Safety in Industry*, 4, 43–51. doi: <http://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-4-43-51>

27. Lyashenko, V. I., Khomenko, O. E. (2019). Enhancement of confined blasting of ore. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 11, 59–72. doi: <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-0-59-72>

28. Lyashenko, V., Topolnij, F., Dyatchin, V. (2019). Development of technologies and technical means for storage of waste processing of ore raw materials in the tailings dams. *Technology Audit and Production Reserves*, 5 (3 (49)), 33–40. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.184940>

*The object of research is the technology and facilities for underground mining of ores in the disrupted massifs. One of the most problematic places is the formation of man-made voids, which influence the occurrence and redistribution of stress-strain*

*state (SSS) of the rock massif. Their existence in the earth's crust provokes the influence of geomechanical and seismic phenomena, up to the level of earthquakes.*

*The study used:*

*– data from literature sources and patent documentation in the field of technologies and facilities for underground mining of ores in the energy-disrupted massifs of substantiation of technological parameters of operating units;*

*– laboratory and production experiments;*

*– physical modeling and selection of compositions of solidifying mixtures.*

*Analytical researches, comparative analysis of theoretical and practical results by standard and new methods with the participation of the authors were performed.*

*The questions of seismogeodynamic monitoring of the SSS of the rock massif during the safe development of rock-type ore deposits are considered. The interaction of natural and man-made systems providing geomechanical balance of ore-bearing massifs is shown. Possibilities of controlling the geomechanics of a massif with filling of man-made voids with various solid mixtures and tails of underground leaching of metals from substandard ores are investigated. The typification of processes is given and the distinctive features of underground block leaching of metals from rock ores are formulated in the aspect of controlling the geodynamics of the massif. The principle estimation of the combined technologies with rationalization of use of the SSS of the rock massif for regulation of the sign and magnitude of stresses in natural and artificial conditions is shown. The conclusions about the effectiveness of the controlled interaction of natural and man-made systems, ensuring the geomechanical balance of massifs and the earth's surface in the area of subsoil development over a long period of time. The research results can be used in the underground development of ore deposits of complex structure of Ukraine, the Russian Federation, the Republic of Kazakhstan and other developed mining countries of the world.*

**Keywords:** *stress-strain state, rock massif, underground development, environmental protection technology, geomechanical balance.*