

## Обоснование безопасности подземной разработки сложноструктурных рудных месторождений в энергонарушенных массивах

Голик В. И.<sup>1\*</sup>, Разоренова Е. Ю.<sup>2</sup>, Стась В. П.<sup>3</sup>, Стась П. П.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Северо-Кавказский государственный технологический университет, г. Владикавказ, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

\*e-mail: v.i.golik@mail.ru

### Реферат

**Введение.** Сегодня разработка сложноструктурных рудных месторождений в энергонарушенных массивах характеризуется сокращением рудных площадей, снижением содержания металла в руде, ухудшением горно-геологических и горнотехнических условий и повышением требований к безопасности жизнедеятельности человека в зоне влияния горных объектов.

**Цель работы.** Обоснование безопасности подземной разработки сложноструктурных рудных месторождений с учетом геомеханического состояния энергонарушенных массивов путем использования графоаналитических методов расчета устойчивых параметров обнажений вмещающих пород и закладочного материала при их подработке.

**Методы исследования.** Использован системный подход, который содержит анализ результатов научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ по разработке новых технологий и технических средств, обеспечивающих рациональное использование, охрану недр, окружающей природной среды и населения с учетом нового приборного, геолого-маркшейдерского и геомеханического обеспечения по стандартным и новым методикам.

**Результат.** Рекомендован графоаналитический метод (номограммы и расчетные формулы) по обоснованию безопасных параметров камер на основании результатов многолетних исследований при подземной разработке месторождений сложной структуры в зависимости от свойств горного массива. Безопасные параметры определяются из опыта для сильно-, средне- и слаботрециноватого горного массива при горизонтальном его обнажении. Составлена «Инструкция по геомеханическому обоснованию безопасной отработки запасов на шахтах ГП «ВостГОК», Украина. Это позволит повысить горнотехническую и экологическую безопасность работ на месторождениях Российской Федерации, Республики Казахстан, Украины и других развитых горнодобывающих стран мира.

**Ключевые слова:** рудные месторождения; подземная разработка; энергонарушенные массивы; рациональное использование; охрана недр; окружающая среда; горнотехническая и экологическая безопасность.

**Благодарность.** В создании, совершенствовании и внедрении научных разработок принимали участие и оказывали содействие специалисты: ГП «УкрНИПИИпромтехнологии» и ГП «ВостГОК», г. Желтые Воды, Украина; Национального технического университета «Днепровская политехника», г. Днепр, Украина; АО «ВНИПИИпромтехнологии», г. Москва, и АО «Всероссийский научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела (АО «ВНИМИ»), г. Санкт-Петербург, Россия; АО «ЦГХК», г. Степногорск, Республика Казахстан.

В работе принимали участие В. Н. Мосинец, Е. А. Котенко, В. И. Голик, Р. Ш. Азимов, М. Н. Слепцов, А. Х. Дудченко, И. А. Ахвердиев, П. Т. Крук, Ю. В. Трифонов, А. Н. Каширный, В. Н. Листов, Ю. Я. Савельев, В. З. Дятчин, А. А. Ткаченко, В. П. Картавий.

**Введение.** Практикой отработки месторождений, локализованных в скальных массивах, доказано, что для управления их состоянием в большей мере применима известная теория М. М. Протодяконова (1933) [1], в соответствии с которой на выработку действует лишь масса пород, заключенных в пределах свода, высотой значительно меньшей глубины работ. В дальнейшем эта теория конкретизирована. В частности, В. Д. Слесарев (1948) [2] установил решающий параметр – сопротивление разрыву горных пород, образующих балку; А. А. Борисов (1980) [3] увязал ее с устойчивостью слоя пород в кровле выработки; С. В. Ветров (1975) [4] определил устойчивое положение выработки как равенство между прочностью заклинивающихся пород, образующих шарнирную арку массивом в пределах свода естественного равновесия. В последующем определено, что сохранение земной поверхности от разрушения обеспечивается регулированием уровня напряжений в разнопрочных участках, взаимосвязью выемки руды во времени, пространстве и степени ее подготовленности к добыче, и на этой основе предложены новые природо-, и ресурсосберегающие технологии, которые дали положительные результаты при подземной разработке сложноструктурных рудных месторождений в энергонарушенных массивах Украины, Российской Федерации, Республики Казахстан и других развитых горнодобывающих стран мира [5, 6]. Поэтому повышение безопасности подземной разработки таких месторождений с учетом геомеханического обоснования оптимальных параметров и схем ведения горных работ, рациональных способов управления горным давлением, прочности и составов твердеющей закладочной смеси, порядка отработки рудных залежей, экономически целесообразной интенсивности производственных процессов, обеспечивающих сохранность земной поверхности и объектов жилой застройки в зоне влияния горных работ – важная научная, практическая и социальная задача, требующая оперативного решения [7, 8]. Данная работа является продолжением исследований, основные научные и практические результаты которых наиболее полно освещались в работах [9–17 и др.].

**Цель работы** – обоснование безопасности подземной разработки сложноструктурных рудных месторождений с учетом геомеханического состояния энергонарушенных массивов на основании графоаналитических методов расчета устойчивых параметров обнажений вмещающих пород и закладочного материала при их подработке.

**Методика исследований.** Авторами проведен технологический аудит и выполнены анализ ранее проведенных исследований и контрольных наблюдений, математическое и физическое моделирование в области развития методов, технических средств для создания природо-, и ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих повышение горнотехнической и экологической безопасности разработки месторождений в энергонарушенных массивах, лабораторные исследования и шахтные эксперименты, а также теоретический анализ и обобщение результатов исследований данных геомеханического и сейсмического мониторингов по стандартным и новым методикам [12].

**Обсуждение и оценка полученных результатов.** Исследуемым вопросам посвящены работы А. Ф. Булата, А. Н. Зорина, В. В. Виноградова, Т. А. Паламарчук в ИГТМ им. Н. С. Полякова НАН Украины (г. Днепр, Украина); М. М. Протодяконова, А. Н. Динника, А. В. Савостьянова, С. Г. Борисенко, А. И. Зильбермана, В. И. Бондаренко, П. И. Пономаренко, Г. А. Симановича, Л. Н. Ширина, В. И. Бузило, И. А. Ковалевской, В. Я. Кириченко, Ю. М. Халимендика, О. Е. Хоменко – в Национальном техническом университете «Днепровская политехника» (г. Днепр,

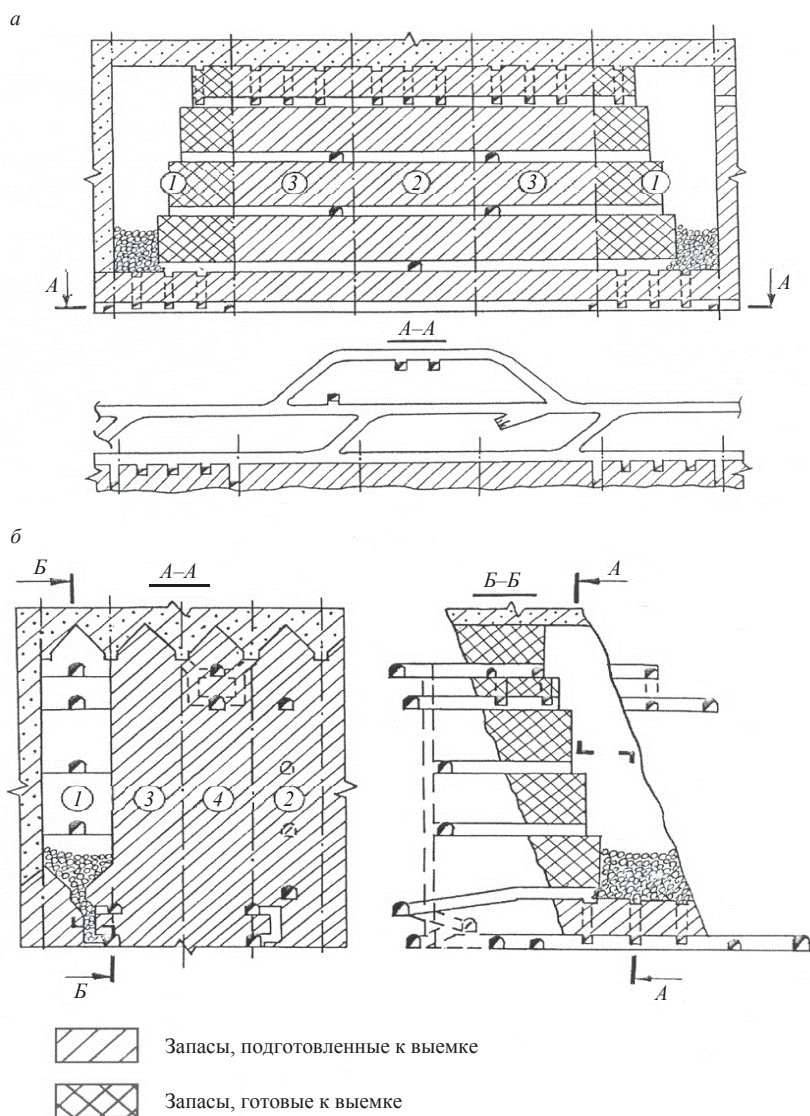


Рисунок 1. Система разработки подэтажными штреками (ортами) с закладкой выработанного пространства твердеющей смесью:

*a* – подэтажные штреки; *б* – подэтажные орты; 1–4 – последовательность отработки запасов камер в эксплуатационном блоке

Figure 1. The system of sublevel stoping (by ortz) with backfilling using the hardening mixture:

*a* – sublevel roadway; *b* – sublevel ortz; 1–4 – the sequence of chamber reserves development in the operational block

Украина); Г. М. Малахова, Ю. П. Капленко, В. Ф. Лавриненко, Б. Н. Андреева, Е. И. Логачева, В. А. Калиниченко – в Криворожском национальном университете; А. Г. Каткова, И. С. Зицера, В. С. Нигматуллина, В. П. Волощенко, В. В. Цариковского, Г. К. Хижняка, А. П. Григорьева, В. Д. Запорожца, В. И. Никонца – в ГНИГРИ Криворожского национального университета (г. Кривой Рог, Украина); М. Н. Слепцова, И. К. Поддубного, П. И. Рягузова, А. Х. Дудченко – в ГП «УкрНИПИИПромтехнологии» (г. Желтые Воды, Украина) и др. [13–16].

**Определение основных параметров камер.** Геометрические параметры камер должны обеспечивать устойчивость обнажений массива без значительных обрушений (не более 300 м<sup>3</sup>), препятствующих отработке запасов эксплуатационного блока. Методы определения геометрических параметров камер авторы разделяют на аналитические и эмпирические. Аналитические методы базируются на положениях теории упругости и пластичности, но незнание первоначального напряженного состояния, недостаточная точность констант физико-механических свойств массива снижают эффективность этих методов [17]. Эмпирический

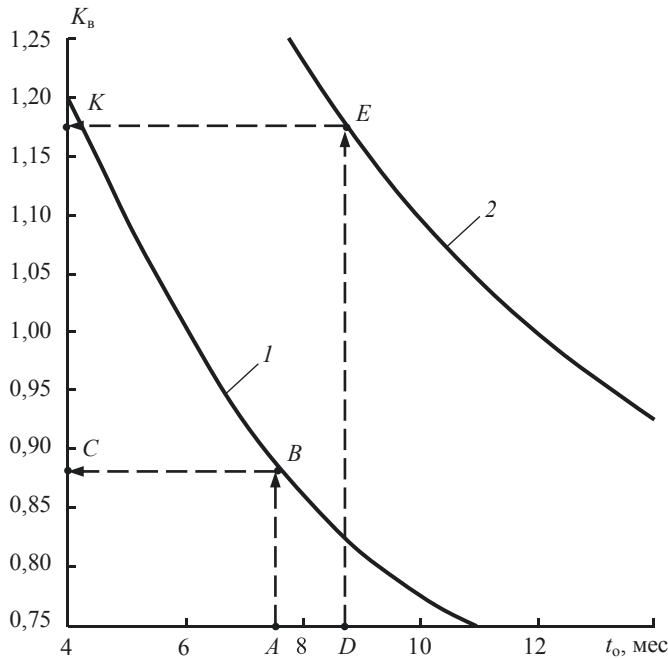


Рисунок 2. Номограмма для определения коэффициента изменения длины камеры от времени ее отработки и закладки:  
1, 2 – камера выходит под закладку и рудный (породный) целик соответственно

Figure 2. Nomogram for determining the chamber length variation ratio to the time of its development and backfilling:  
1, 2 – chamber under the backfill and the ore pillar, respectively

метод основан на применении графического анализа данных с использованием закономерностей и функциональных зависимостей. Примерами служат методы функциональных характеристик для обоснования геометрических параметров этажно-камерных систем разработки в Кривбассе (Украина), а также метод ВНИМИ (Санкт-Петербург, Россия) по установлению размеров камер и целиков при камерных системах разработки руд цветных металлов [18].

Напряженное состояние массива горных пород, определяющее устойчивость обнажения выработки, формируется под влиянием горно-геологических факторов, главными из которых являются: трещиноватость пород; глубина разработки; угол наклона обнажения к горизонту; эквивалентный пролет обнажения; время существования обнажения; характер опоры или очередность подработки [19].

Устойчивость обнажения характеризуется величиной эквивалентного пролета. Расчеты параметров камер выполнены исходя из следующих условий: руда

и вмещающие породы устойчивые, средней трещиноватости; крепость по шкале М. М. Протодьяконова – 12–18°, угол падения залежей – больше 50°; при мощности рудных тел 3–15 м применяется система разработки подэтажными штреками, больше 15 м – подэтажными ортами (рис. 1). Высота этажа 60 и 70 м, подэтажей – 15–18 м; порядок отработки подэтажей почвоуступный, бурение восходящими веерами скважин диаметром 57 и 65 мм; пустоты погашаются твердеющей закладкой прочностью от 1,5 до 6,0 МПа [20].

**Таблица 1. Безопасные параметры камер для рудных месторождений**  
**Table 1. Safe parameters of chambers for ore deposits**

Параметр	Расчетные формулы
Эквивалентные пролеты при обнажениях $L_{\text{экр}}, \text{ м}$ :	
правильной формы	$L_{\text{экр}} = \frac{a\sigma}{\sqrt{a^2 + \sigma^2}}$
неправильной формы	$L_{\text{экр}} = \frac{2,5S}{P_0}$
Критерий устойчивости обнажений $L_{\text{эдоп}}, \text{ м}$	$L_{\text{экр}} = L_{\text{эдоп}} = \frac{L_{\text{эо}}}{1,1}$
Устойчивые пролеты, м:	
горизонтальный $L_{\text{г.экр}}$	$L_{\text{г.экр}} = \frac{a\sigma}{\sqrt{a^2 + \sigma^2}}$
вертикальный $L_{\text{в.экр}}$	$L_{\text{в.экр}} = \frac{aH}{\sqrt{a^2 + H^2}}$
Эквивалентный пролет $L_{\text{эо}}, \text{ м}$ , с учетом времени существования обнажений $t$ , мес	$L_{\text{эо}}^2 t = \text{const} = A$
Эквивалентные пролеты для закладки, м:	
горизонтальный	$L_{\text{г.экр}} = \sqrt{\frac{2\sigma_{\text{из}} h_{\text{сл}}}{\gamma_3 K_3}}$
вертикальный	$L_{\text{в.экр}} = \frac{2C_{\text{м}}}{\gamma_3 K_3} \text{ctg}\left(45^\circ + \frac{\rho}{2}\right)$
Устойчивость обнажений, м:	
длина $a$	$a = \frac{L_{\text{г.экр}} b}{\sqrt{b^2 + L_{\text{г.экр}}^2}}$
ширина $b$	$b = \frac{L_{\text{г.экр}}^2 a}{\sqrt{a^2 + L_{\text{г.экр}}^2}}$
высота $H$	$H = \frac{L_{\text{в.экр}} a}{\sqrt{a^2 + L_{\text{в.экр}}^2}}$

**Теория вопроса. Графоаналитический метод расчета устойчивости обнажений вмещающих пород и массива закладки.** Рассмотрим геометрические параметры системы разработки подэтажными штреками для рудных залежей с горизонтальной мощностью до 15 м, когда длина камеры по простиранию в 2–3 раза и более превышает ширину (мощность).

Для условий заземления по периметру неправильной (отличной от прямоугольной) формы эквивалентный пролет определяется согласно формуле:

$$L_{\text{экв}} = 2,5S/P_0,$$

где  $S$  – площадь обнажения,  $\text{м}^2$ ;  $P_0$  – длина опорного периметра,  $\text{м}$ .

Критерий устойчивого состояния примыкающей к обнажению краевой части массива горных пород определяется по формуле:

$$L_{\text{экв}} \leq L_{\text{э,доп}} = L_{\text{эо}}/1,1,$$

где  $L_{\text{э,доп}}$  – предельно допустимый пролет обнажения выработки бесконечной длины,  $\text{м}$ ;  $L_{\text{эо}}$  – предельный пролет перед массовым обрушением горных пород (объемом более  $250 \text{ м}^3$ ), определенный опытным путем,  $\text{м}$ .

По известным величинам эквивалентного пролета определяются длина и ширина обнажения из выражений:

$$a = \epsilon / \sqrt{\left(\frac{\epsilon}{L_{\text{экв}}}\right)^2 - 1}; \quad \epsilon = a / \sqrt{\left(\frac{a}{L_{\text{экв}}}\right)^2 - 1}.$$

Для сложноструктурных рудных месторождений в энергонарушенных массивах величину устойчивого пролета плоской незакрепленной кровли между целиками, поддерживающими породы внутри предельного свода естественного равновесия, рассчитывали на основе представления о распределении действующих сил в своде естественного равновесия. Анализ соотношения нормативной и фактической прочности твердеющей закладочной смеси показывает, что расхождение между их значениями составляет 20–50 %. Время существования обнажения учитывается временным коэффициентом  $K_{\text{в}}$  (рис. 2):

$$K_{\text{в}} = \sqrt{\frac{t_1}{t_0}},$$

где  $t_1$  – время, за которое камера может быть отработана при интенсивном ведении работ,  $\text{мес}$ ;  $t_0$  – исходное расчетное время отработки,  $\text{мес}$ .

Для камер, выходящих под заложенное пространство, значение  $K_{\text{в}}$  изменяется от 0,76 до 1,10 и определяется согласно формуле:

$$t_1 = 0,5t_2 + t_3 = 6 \text{ мес},$$

где  $t_2$ ,  $t_3$  – время отбойки запасов камеры и стояния ее до полной закладки соответственно,  $\text{мес}$ .

Для камер, выходящих под рудный массив, значение  $K_{\text{в}}$  изменяется от 0,92 до 1,23 и определяется согласно формуле:

$$\begin{aligned} t_1 &= 0,5t_2 + t_3 = 12 \text{ мес}; \\ t_0 &= 0,5t_2 + t_3. \end{aligned} \quad (1)$$



На основании результатов проведения комплекса научно-исследовательских работ при подземной разработке сложноструктурных рудных месторождений в энергонарушенных массивах авторы предлагают расчетные формулы по обоснованию безопасных и эффективных параметров камер с учетом устойчивости их обнажений (табл. 1, где  $S$  и  $P_0$  – площадь и периметр обнажения,  $\text{м}^2$ ,  $\text{м}$ ;  $A$  – постоянная величина, значение которой зависит от свойств горного массива и определяется из опыта, ед.;  $\sigma_{\text{из}}$  – предел прочности закладки на изгиб,  $\text{т/м}^2$ ;  $h_{\text{сл}}$  – толщина нижнего монолитного слоя закладки (в расчетах принято  $h_{\text{сл}} = 4$  м);  $\gamma_3$  – приведенный объемный вес закладки,  $\text{т/м}^3$ ;  $K_3$  – коэффициент запаса (в расчетах принято  $K_3 = 3$ );  $C_m$  – коэффициент сцепления массива закладки,  $\text{т/м}^2$ ;  $\rho$  – угол внутреннего трения (в расчетах принято  $\rho = 32^\circ$ )).

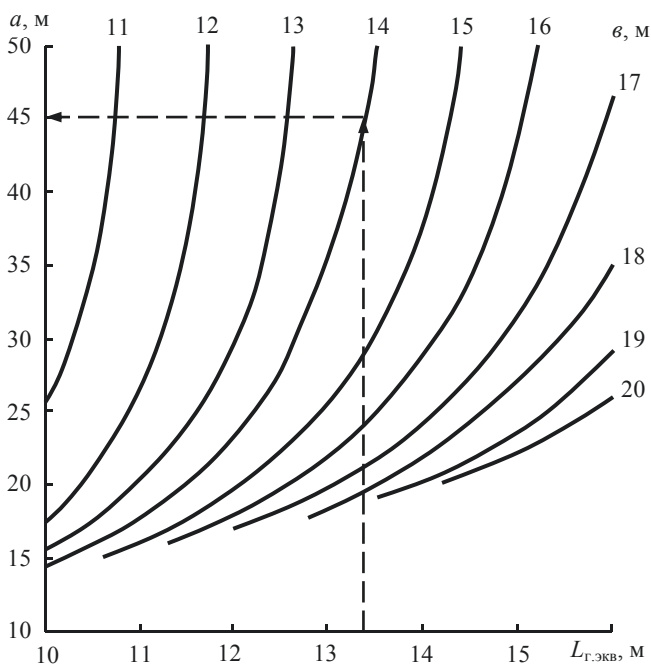


Рисунок 3. Номограмма для определения длины камеры в зависимости от предельно допустимого эквивалентного пролета горизонтального обнажения

Figure 3. Nomogram for determining the chamber length variation ratio to the maximum equivalent span of a horizontal outcrop

Для обеспечения безопасности горных работ в зоне влияния пустот отработанных камер выполнены: прогноз напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива и оценка условий динамического проявления горного давления; организация системы геомеханического мониторинга за НДС горного массива и устойчивостью обнажений камер; оснащение шахт аппаратурой и приборами для проведения геомеханического и сейсмического мониторингов; обучение персонала шахт проведению наблюдений и контролю НДС горного массива [21].

Геометрические параметры камер (длина  $a$ , ширина  $b$ ), а также величины эквивалентного горизонтального и вертикального пролетов, обеспечивающие устойчивость закладочного массива, находятся по зависимостям, представленным на рис. 3.

В первичных камерах допустимый эквивалентный пролет обнажений зависит от крепости вмещающих пород руды и глубины разработки (рис. 4). Эквивалентный пролет горизонтального обнажения при мощности рудных тел до 3 м и прочности закладки на сжатие более 3,0 МПа может быть неограниченной длины [22].

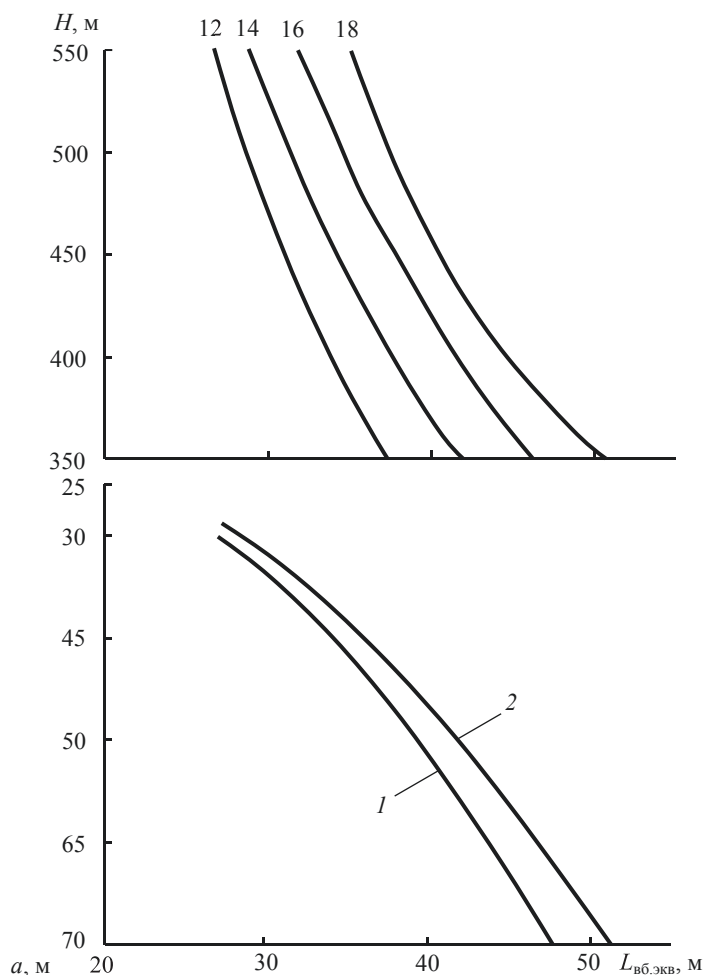


Рисунок 4. Номограмма для определения длины камеры  $a$  в зависимости от предельного эквивалентного пролета обнажения пород висячего бока  $L_{\text{вб.экв}}$  и глубины разработки  $H$ :

1, 2 – высота камеры 60 м и 70 м соответственно; 12, 14, 16, 18 – крепость пород

Figure 4. Nomogram for determining the chamber  $a$  length variation ratio to the maximum equivalent span of the superincumbent bed outcrop  $L_{\text{вб.экв}}$  and the excavation depth  $H$ :

1, 2 – chamber height 60 m and 70 m, respectively; 12, 14, 16, 18 – rock strength

**Исходные данные по твердеющей закладке.** В последние годы происходит существенное изменение оценки влияния подземных работ на окружающую среду. Развитие природоохранных тенденций предусматривает приоритетное значение сохранения земной поверхности и здоровья человека. Это достигается главным образом путем применения технологии выемки руд с закладкой выработанного пространства, доля участия которой в общем объеме добычи минерального сырья



превышает 60 %, и этот показатель ограничивается высокой стоимостью и дефицитностью компонентов закладки [23].

Поэтому одним из направлений решения этой задачи является оптимизация основного параметра – нормативной прочности искусственных массивов с учетом зависимости между геомеханическими характеристиками массивов горных пород и эффективностью управления ими с позиций сохранения земной поверхности. Устойчивость горизонтальных и вертикальных обнажений закладки находится в прямой зависимости от качества закладочной смеси, времени твердения и монолитности (рис. 5).

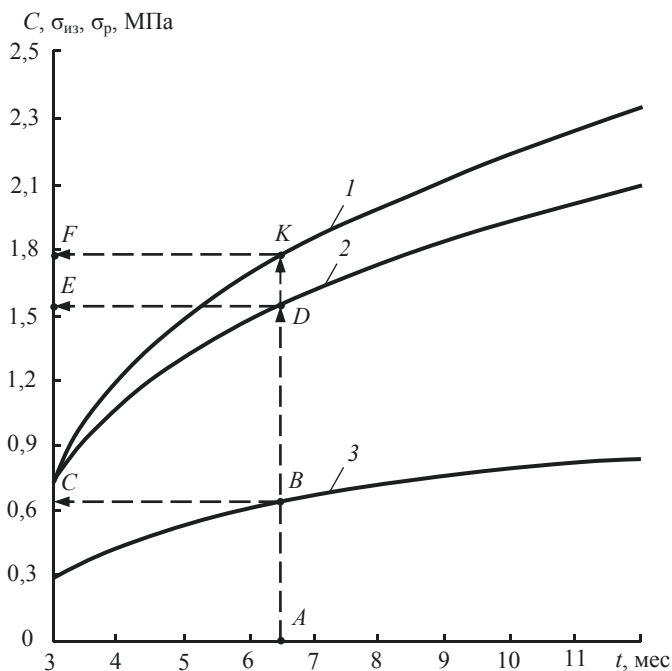


Рисунок 5. Прочностные характеристики закладки в зависимости от периода твердения:

1, 2, 3 – коэффициент сцепления  $C$ , предел прочности на изгиб  $\sigma_{из}$  и растяжение  $\sigma_p$ , МПа, соответственно; ключ:  $A-B-C$ ;  $A-D-E$ ;  $A-K-F$

Figure 5. Strength characteristics of backfilling depending on the hardening period:  
1, 2, 3 – adhesion coefficient  $C$ , ultimate bending strength  $\sigma_{из}$  and tensile strength  $\sigma_p$ , MPa, respectively; key:  $A-B-C$ ;  $A-D-E$ ;  $A-K-F$

Прочность контакта *порода–закладка* на изгиб и растяжение равна прочности закладки по этим показателям. Угол внутреннего трения  $\rho$  принят  $32^\circ$ . Монолитность закладки зависит от степени расслоения смеси в перерывах при закладке камер. Изменение соотношения составляющих компонентов в расслоившейся части закладки уменьшает более чем на  $1/3$  расчетные прочностные свойства [24].

**Влияние времени отработки и закладки камер на устойчивость обнажений.** Большое значение для оценки устойчивости обнажений массива имеет интенсивность отработки и закладки камер (рис. 5). Проведенные исследования показали, что величина устойчивого эквивалентного пролета обнажения  $L_{экр}$  и время его существования  $t$  определяются по зависимости:  $L_{экр}^2 t = const = A$  (табл. 1). Так, для сложноструктурных рудных месторождений в энергонарушенных мас-

сивах Украины величина  $A$  изменяется от 26 800 (сильнотрещиноватый массив) до 220 000 (слаботрещиноватый массив) при горизонтальном обнажении массива и от 75 000 (сильнотрещиноватый массив) до 1 060 000 (слаботрещиноватый массив) при обнажении пород всякого бока [25].

Срок обнажения твердеющей закладки, ее прочность на сжатие в зависимости от предельно допустимых эквивалентных пролетов горизонтального и вертикального обнажений камер первой очереди определяется по номограмме (рис. 6).

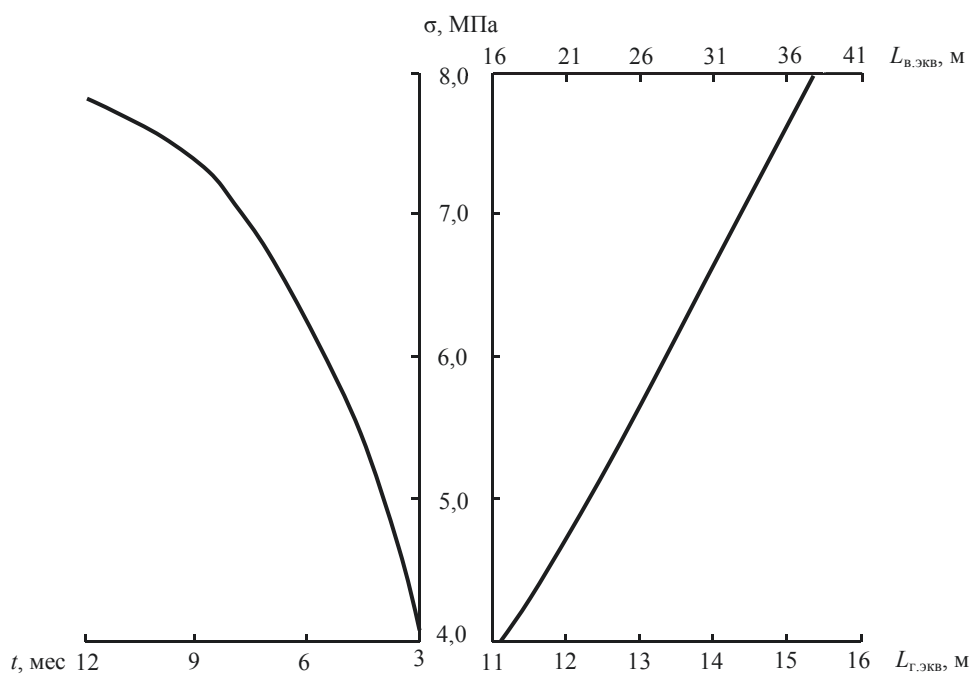


Рисунок 6. Номограмма определения срока обнажения твердеющей закладки по ее прочности  
Figure 6. Nomogram for determining the hardening backfill outcropping time by its strength

Предельный эквивалентный пролет обнажения потолочин определяется по номограмме (рис. 7).

**Пример расчета параметров камер.** *Исходные данные.* Мощность рудного тела – 14 м; наклонная высота этажа – 75 м; глубина разработки – 450 м; крепость вмещающих пород по шкале М. М. Протодяконова – 14; возраст твердения закладки вышележащей камеры – 6 мес; время отработки эксплуатационного блока – 8 мес; его погашение твердеющей закладочной смесью – 2 мес [26].

*Решение.* По номограмме (рис. 2) находят допустимые пролеты горизонтального и вертикального обнажений. По пересечению линии, соответствующей этим значениям на номограмме (рис. 5), определяют на вертикальной оси длину камеры. По номограмме (рис. 3) находят длину камеры по условию наклона обнажения. Значение  $K_v$  находится согласно формуле (1):  $t_1 = 0,5t_2 + t_3$ . По номограмме (рис. 2) можно определить необходимое время твердения закладки или время отработки и закладки, необходимое для увеличения длины блока. Опустив перпендикуляр из точки пересечения кривой данной мощности с данной длиной камеры на горизонтальную ось, получим устойчивые эквивалентные пролеты обнажений (рис. 2). Таким образом, для увеличения длины эксплуатационного блока следует либо

начать его отработку позже, либо ускорить отбойку и погашение твердеющей закладочной смесью на несколько дней по отношению к намеченному сроку [27, 28].

**Результаты внедрения исследований.** В результате проведения комплекса научно-исследовательских работ установлен современный технический уровень применяемой системы с учетом безопасности разработки, стандартизированы ее элементы и технологические процессы, составлен комплект стандартов предприятия «Система разработки подэтажными штреками (ортами) с закладкой выработанного пространства твердеющей смесью. Параметры и размеры», который

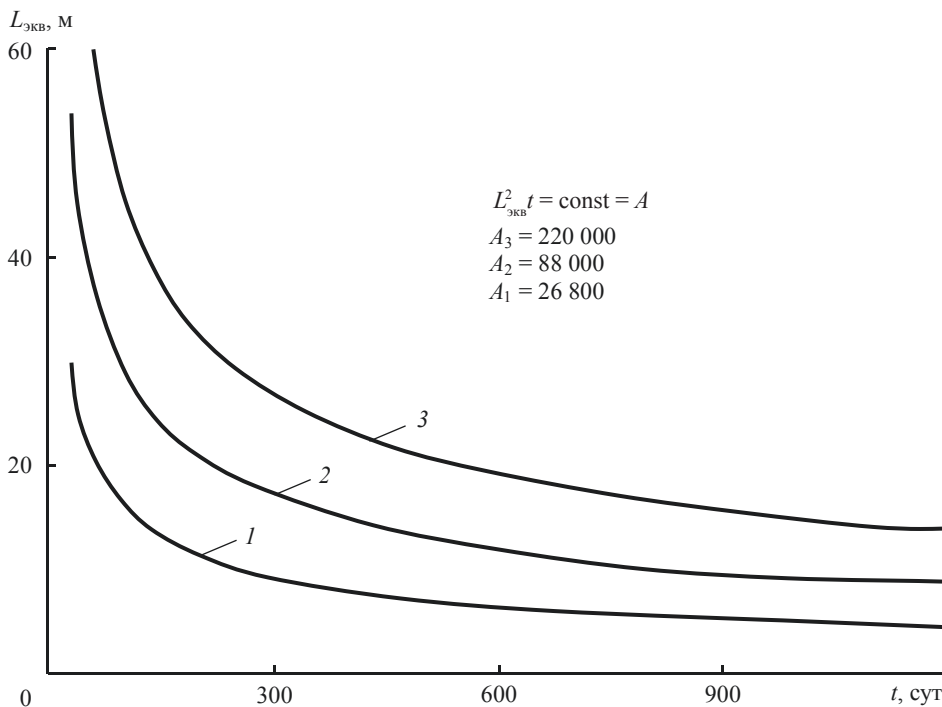


Рисунок 7. Номограмма для определения предельного эквивалентного пролета обнажения потолочин:

1, 2, 3 – сильно-, средне- и слаботрециноватый горный массив соответственно

Figure 7. Nomogram for determining the maximum equivalent span of the crown pillar outcrop:

1, 2, 3 – highly, moderately and sparsely jointed rock mass, respectively

регламентирует (в зависимости от горно-геологических условий) длину, ширину и высоту камер первой, второй и третьей очередей выемки, их предельно допустимые значения с учетом изменения прочностных свойств закладки при ее твердении и глубины разработки, высоту подэтажа и днища блока, расстояние между выпускными погрузочно-доставочными выработками (дучками) в зависимости от мощности рудного тела и высоты этажа, форму и размеры поперечных сечений основных боковых 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. Комплект стандартов внедрен на горных предприятиях Украины и успешно используется специалистами технологических и геолого-маркшейдерских служб [29].

**Заключение.** Приведенные результаты теоретических и экспериментальных исследований могут служить достаточными научно-техническими предпосылками для выбора и обоснования безопасной технологии при доработке запасов сложноструктурных рудных месторождений в энергонарушенных массивах на действующих рудниках, а также при проектировании горных работ с аналогичными горно-геологическими условиями. На основании указанных результатов авторами сделаны следующие выводы.

Допустимый эквивалентный пролет горизонтального обнажения при прочности твердеющей закладки на одноосное сжатие более 3,0 МПа всегда меньше вертикального. Если ширина камеры меньше эквивалентного пролета горизонтального обнажения, длина ее ограничивается устойчивостью вертикального обнажения, а для камер, расположенных по простиранию рудных залежей – устойчивостью вмещающих пород висячего бока. Геометрические параметры камер, устойчивость вертикальных и горизонтальных обнажений находятся в зависимости от интенсивности отработки и закладки камер. Чем быстрее обрабатывается и закладывается камера, тем больше допускается обнажение.

Для камер, выходящих под заложенное пространство, значение временного коэффициента изменяется от 0,76 до 1,10, а для выходящих под рудный массив – от 0,92 до 1,23. Повышение интенсивности работ в 2–3 раза позволило снизить нормативную прочность твердеющей закладки с 8,0 до 3,0 МПа, в 1,5–2 раза сократить расходы вяжущего, использовать низкосортные пески и отходы горно-обогатительного производства. В результате решена проблема дефицита инертных заполнителей и на 30–50 % снижена себестоимость закладочных работ.

Рекомендован графоаналитический метод (номограммы и расчетные формулы) по обоснованию безопасных параметров камер на основании результатов многолетних исследований при подземной разработке месторождений сложной структуры в зависимости от свойств горного массива, которые определяются из опыта для сильно-, средне- и слаботрещиноватого горного массива при горизонтальном его обнажении. Составлена «Инструкция по геомеханическому обоснованию безопасной отработки запасов на шахтах ГП «ВостГОК», Украина.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Протодьяконов М. М. Давление горных пород и рудничное крепление. Ч. 1. Давление горных пород. М.: ГНТГИ, 1933. 128 с.
2. Слесарев В. Д. Определение оптимальных размеров целиков различного назначения. М.: Углетехиздат, 1948. 57 с.
3. Борисов А. А. Механика горных пород и массивов. М.: Недра, 1980. 359 с.
4. Ветров С. В. Допустимые размеры обнажений горных пород при подземной разработке руд. М.: Наука, 1975. 223 с.
5. Gridley N. C., Salcedo L. Cemented paste production provides opportunity for underground ore recovery while solving tailings disposal needs. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2011. 431 p.
6. Lottermoser B. Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts. New York: Springer, 2012. 400 p.
7. Maanju S. K., Saha K. Impact of mining industry on environmental fabric – a case study of Rajasthan state in India // Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology. 2013. Vol. 6. Iss. 2. P. 8–13.
8. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use // Metallurgical and Mining Industry. 2015. No. 3. P. 49–52.
9. Ляшенко В. И., Скипочка С. И., Яланский А. А., Паламарчук Т. А. Геомеханический мониторинг при подземной разработке месторождений сложной структуры // Известия вузов. Горный журнал. 2012. № 4. С. 109–119.
10. Хоменко О. Е., Ляшенко В. И. Геоэнергетические основы подземной разработки рудных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 8. С. 10–18.
11. Голик В. И., Разоренов Ю. И., Вагин В. С., Ляшенко В. И. Исследование и разработка составов твердеющей смеси на основе нетрадиционных отходов производства // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 3. С. 13–27. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-13-27

12. Vladyko O., Maltsev D., Shapovalov Ya. Choice of development method for technogenic mineral deposits by technological criteria // *Mining of Mineral Deposits*. 2016. No. 10(4). P. 74–82. URL: <https://doi.org/10.15407/mining10.04.074>
13. Yuan Y., Bolan N., PrévotEAU A., Vithanage M., Biswas J. K., Ok Y. S., Wang H. Applications of biochar in redox-mediated reactions // *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 246. P. 271–281. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.154>
14. Petlovanyi M., Kuzmenko O., Lozynskiy V., Popovych V., Sai K., Saik P. Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine // *Mining of Mineral Deposits*. 2019. No. 13(1). P. 24–38. <https://doi.org/10.33271/mining13.01.024>
15. Blyuss B., Semenenko Ye., Medvedieva O., Kyrychko S., Karatayev A. Parameters determination of hydromechanization technologies for the dumps development as technogenic deposits // *Mining of Mineral Deposits*. 2020. No. 14(1). P. 51–61. URL: <https://doi.org/10.33271/mining14.01.051>
16. Lyashenko V., Topolnij F., Dyatchin V. Development of technologies and technical means for storage of waste processing of ore raw materials in the tailings dams // *Technology Audit and Production Reserves*. 2019. No. 5(3(49)). P. 33–40. DOI: 10.15587/2312-8372.2019.184940
17. Lyashenko V., Khomenko O., Golik V., Topolnij F., Helevera O. Substantiation of environmental and resource-saving technologies for void filling under underground ore mining // *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. No. 2(3(52)). P. 9–16. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.200022
18. Lyashenko V., Khomenko O., Chekushina T., Topolnij F., Dudar T. Assessment of environmental and resource-saving technologies and technical means for processing and disposal of man-made formations and waste // *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. No. 4/3(54). P. 21–28. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.210666
19. Khomenko O., Tsendjav L., Kononenko M., Janchiv B. Nuclear-and-fuel power industry of Ukraine: production, science, education // *Mining of Mineral Deposits*. 2017. Vol. 11. No. 4. P. 86–95.
20. Добыча и переработка урановых руд в Украине: монография / под ред. А. П. Чернова. К.: Адеф–Украина, 2001. 238 с.
21. Аверьянов К. А., Ангелов В. А., Ахмедьянов И. Х., Рыльникова М. В. Развитие классификации техногенного сырья горных предприятий и обоснование технологий его активной утилизации // *ГИАБ*. 2012. № 5. С. 208–213.
22. Ляшенко В. И., Голык В. И., Хоменко О. Е. Повышение геодинамической безопасности подземной разработки сложноструктурных рудных месторождений // *Черная металлургия*. 2017. № 3. С. 24–32.
23. Volkov E. P., Anushenkov A. N. Developing the technology of mine stowing with processing tailings based hardening blends // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 7: 5–13. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-7-5-13
24. Lyashenko V. I., Chekushina T. V., Dudar T. V., Lisovoy I. A. Environmental and resource-saving technologies for void extinguishing during underground ore mining // *Ecology and Industry of Russia*. 2020. Vol. 4. Iss. 8. P. 28–33. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-8-28-33
25. Каряев В. И., Комков А. А., Кузнецов А. В., Плотников И. П. Извлечение меди и цинка из медеплавильных шлаков при восстановительно-сульфидирующей обработке // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2020. Т. 18. № 2. С. 4–12. URL: <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-2-4-12>
26. Хоменко О. Е., Ляшенко В. И. Рациональное использование и охрана недр при подземной разработке рудных месторождений в условиях техногенеза // *Разведка и охрана недр*. 2019. № 4. С. 60–65.
27. Голык В. И., Комашенко В. И., Ляшенко В. И. Рациональное использование и охрана недр при комбинированной разработке рудных месторождений // *Разведка и охрана недр*. 2019. № 11. С. 47–52.
28. Ляшенко В. И., Голык В. И., Дмитрак Ю. В., Франчук В. П. Обоснование параметров вибросамотечного транспорта твердых закладочных смесей в шахты // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2021. Т. 19. № 1. С. 4–16. URL: <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-4-16>
29. Ляшенко В. И., Воробьев А. Е., Хоменко О. Е., Дудар Т. В. Оценка геомеханической и экологической безопасности разработки приповерхностных запасов руд в энергонарушенных массивах комплексными методами // *Маркшейдерия и недропользование*. 2021. № 5(115). С. 37–45. URL: <http://geomar-nedra.ru/issues-journal/journal-2021/625-contens-journal-2021-5.html>

Поступила в редакцию 26 августа 2021 года

#### Сведения об авторах:

**Голык Владимир Иванович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного дела Северо-Кавказского горно-металлургического института. E-mail: [v.i.golik@mail.ru](mailto:v.i.golik@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>

**Разорова Екатерина Юрьевна** – аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. E-mail: [yiri1963@mail.ru](mailto:yiri1963@mail.ru)

**Стась Виктор Павлович** – кандидат технических наук, доцент Тульского государственного университета. E-mail: galina\_sts@mail.ru

**Стась Павел Павлович** – аспирант Тульского государственного университета. E-mail: galina\_sts@mail.ru

УДК 622.274.4:622.34(088.8)

DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-104-119

## Safety rationale for composite ore deposits underground mining in energy distributed masses

Vladimir I. Golik<sup>1</sup>, Ekaterina Iu. Razorenova<sup>2</sup>, Viktor P. Stas<sup>3</sup>, Pavel P. Stas<sup>3</sup>

<sup>1</sup> North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia.

<sup>3</sup> Tula State University, Tula, Russia.

### Abstract

**Introduction.** Composite ore deposits development in energy-disturbed masses is currently characterized by reduced ore areas, lower metal content in ore, deteriorated mining-geological and mining conditions, as well as stringent requirements for human safety in mining facilities influence zone.

**Research objective** is to develop safety rationale for composite ore deposits underground mining, taking into account the geomechanical state of energy disturbed masses based on graph-analytical calculation methods for stable parameters of enclosing rock outcrop and filling material in during processing.

**Methods of research.** A systematic approach was used, which contains an outcome analysis of research, development and design of new technologies and technical means that ensure the rational use and protection of subsoil, environment and population, taking into account advanced instrumental, geological, mine surveying and geomechanical support for standard and new methods.

**Results.** A graphic-analytical method (nomograms and calculation formulas) is recommended to justify safe parameters of chambers based on the results of multi-year research during composite ore deposits underground development and depending on the rock mass properties. Safe parameters are determined from experience for a highly, moderately and sparsely jointed rock mass with horizontal outcrop. The Instruction on the Geomechanical Rationale for Safe Mining at GP VostGOK Mines, Ukraine, was also compiled. This will make it possible to improve mining and environmental safety of operations at the deposits of the Russian Federation, the Republic of Kazakhstan, Ukraine and other developed mining countries of the world.

**Keywords:** ore deposits; underground mining; energy disturbed masses; rational use; protection of subsoil; environment; mining and environmental safety.

**Acknowledgements.** The following specialists took part in developing, improving, and introducing the scientific research results: GP UkrNIPiIpromtekhologii and GP VostGOK, Zhovti Vody, Ukraine; the Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine; JSC VNIPiIpromtekhologii, Moscow, and the Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying (VNIMI), St. Petersburg, Russia; Stepnogorsk Mining and Chemical Combine, Stepnogorsk, the Republic of Kazakhstan.

V. N. Mosinets, E. A. Kotenko, V. I. Golik, R. Sh. Azimov, M. N. Sleptsov, A. Kh. Dudchenko, I. A. Akhverdiev, P. T. Kruk, Iu. V. Trifonov, A. N. Kashirnyi, V. N. Listov, Iu. Ia. Saveliev, V. Z. Diatchin, A. A. Tkachenko, V. P. Kartavyi took part in the research.

### REFERENCES

1. Protodiakonov M. M. *Rock pressure and excavation support. Part 1. Rock pressure*. Moscow: GNTGI Publishing; 1933. (In Russ.)
2. Slesarev V. D. *Determining optimal size of pillars for various purposes*. Moscow: Ugletekhizdat Publishing; 1948. (In Russ.)
3. Borisov A. A. *Mechanics of rocks and massifs*. Moscow: Nedra Publishing; 1980. (In Russ.)
4. Vetrov S. V. *Permissible sizes of rock outcrops during underground mining of ores*. Moscow: Nauka Publishing; 1975. (In Russ.)
5. Gridley N. C., Salcedo L. *Cemented paste production provides opportunity for underground ore recovery while solving tailings disposal needs*. Perth: Australian Centre for Geomechanics Publishing; 2011.
6. Lottermoser B. *Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts*. New York: Springer Publishing; 2012.



7. Maanju S. K., Saha K. Impact of mining industry on environmental fabric – a case study of Rajasthan state in India. *Journal of Environmental Science. Toxicology and Food Technology.* 2013; 6(2): 8–13.
8. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use. *Metallurgical and Mining Industry.* 2015; 3: 49–52.
9. Liashenko V. I., Skipochka S. I., Ialanskii A. A., Palamarchuk T. A. Geomechanical monitoring at underground development of complex structure. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2012; 4: 109–119. (In Russ.)
10. Khomenko O. E., Liashenko V. I. Geoenergetic fundamentals of ore deposits underground mining. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2017; 8: 10–18. (In Russ.)
11. Golik V. I., Razorenov Iu. I., Vagin V. S., Liashenko V. I. Study and development of hardening mixture composition based on unconventional industrial waste. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2021; 3: 13–27. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2021-3-13-27
12. Vladyko O., Maltsev D., Shapovalov Ya. Choice of development method for technogenic mineral deposits by technological criteria. *Mining of Mineral Deposits.* 2016; 10(4): 74–82. Available from: <https://doi.org/10.15407/mining10.04.074>
13. Yuan Y., Bolan N., PrévotEAU A., Vithanage M., Biswas J. K., Ok Y. S., Wang H. Applications of biochar in redox-mediated reactions. *Bioresource Technology.* 2017; 246: 271–281. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.154>
14. Petlovanyi M., Kuzmenko O., Lozynskiy V., Popovych V., Sai K., Saik P. Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits.* 2019; 13(1): 24–38. Available from: <https://doi.org/10.33271/mining13.01.024>
15. Blyuss B., Semenenko Ye., Medvedieva O., Kyrychko S., Karatayev A. Parameters determination of hydromechanization technologies for the dumps development as technogenic deposits. *Mining of Mineral Deposits.* 2020; 14(1): 51–61. Available from: <https://doi.org/10.33271/mining14.01.051>
16. Lyashenko V., Topolnij F., Dyatchin V. Development of technologies and technical means for storage of waste processing of ore raw materials in the tailings dams. *Technology Audit and Production Reserves.* 2019; 5(3(49)): 33–40. Available from: 10.15587/2312-8372.2019.184940
17. Lyashenko V., Khomenko O., Golik V., Topolnij F., Helevera O. Substantiation of environmental and resource-saving technologies for void filling under underground ore mining. *Technology Audit and Production Reserves.* 2020; 2(3(52)): 9–16. Available from: 10.15587/2312-8372.2020.200022
18. Lyashenko V., Khomenko O., Chekushina T., Topolnij F., Dudar T. Assessment of environmental and resource-saving technologies and technical means for processing and disposal of man-made formations and waste. *Technology Audit and Production Reserves.* 2020; 4/3(54): 21–28. Available from: 10.15587/2312-8372.2020.210666
19. Khomenko O., Tsendjav L., Kononenko M., Janchiv B. Nuclear-and-fuel power industry of Ukraine: production, science, education. *Mining of Mineral Deposits.* 2017; 11(4): 86–95.
20. Chernov A. P. (ed.) *Production and milling of uranium ore in Ukraine.* Kyiv: Adef–Ukraina Publishing; 2001. (In Russ.)
21. Averianov K. A., Angelov V. A., Akhmedianov I. Kh., Rylnikova M. V. Developing the classification of anthropogenic raw material at mining enterprises and justifying the technologies for its intensive disposal. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal).* 2012; 5: 208–213 (In Russ.)
22. Lyashenko V. I., Golik V. I., Khomenko O. E. Improving the geodynamic safety of underground mining of complex ore deposits. *Chernaia metallurgii = Ferrous metallurgy.* 2017; 3: 24–32. (In Russ.)
23. Volkov E. P., Anushenkov A. N. Developing the technology of mine stowing with processing tailings based hardening blends. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2019; 7: 5–13. Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2019-7-5-13
24. Lyashenko V. I., Chekushina T. V., Dudar T. V., Lisovoy I. A. Environmental and resource-saving technologies for void extinguishing during underground ore mining. *Ecology and Industry of Russia.* 2020; 4(8): 28–33. Available from: doi: 10.18412/1816-0395-2020-8-28-33
25. Kariaev V. I., Komkov A. A., Kuznetsov A. V., Plotnikov I. P. Recovery of copper and zinc from copper smelting slags during reducing-sulfidizing treatment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University.* 2020; 18(2): 4–12. Available from: <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-2-4-12> (In Russ.)
26. Khomenko O. E., Liashenko V. I. Rational use and protection of subsurface resources in the underground mining of ore deposits in conditions of technogenesis. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources.* 2019; 4: 60–65. (In Russ.)
27. Golik V. I., Komashchenko V. I., Liashenko V. I. Rational use and protection of surfaces in combined development of ore deposits. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources.* 2019; 11: 47–52. (In Russ.)
28. Liashenko V. I., Golik V. I., Dmitrak Iu. V., Franchuk V. P. Rationale for the parameters of the vibration gravity transportation of solidifying filling mixtures to mines. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo*

*tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2021; 19(1): 4–16 (In Russ.). Available from: <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-4-16>

29. Liashenko V. I., Vorobev A. E., Khomenko O. E., Dudar T. V. Assessment of geomechanical and environmental safety of the development of near-surface ore reserves in energy disturbed massifs using complex methods. *Marksheideriia i nedropolzovanie = Mine Surveying and Subsurface Use*. 2021; 5(115): 37–45. Available from: <http://geomar-nedra.ru/issues-journal/journal-2021/625-contens-journal-2021-5.html> (In Russ.)

Received 26 August 2021

#### Information about the authors:

**Vladimir I. Golik** – DSc (Engineering), Professor, professor of the Mining Engineering Department, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University). E-mail: [v.i.golik@mail.ru](mailto:v.i.golik@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>

**Ekaterina Iu. Razorenova** – PhD student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. E-mail: [yiri1963@mail.ru](mailto:yiri1963@mail.ru)

**Viktor P. Stas** – PhD (Engineering), associate professor of Tula State University. E-mail: [galina\\_sts@mail.ru](mailto:galina_sts@mail.ru)

**Pavel P. Stas** – PhD student, Tula State University. E-mail: [galina\\_sts@mail.ru](mailto:galina_sts@mail.ru)

**Для цитирования:** Голик В. И., Разоренова Е. Ю., Стась В. П., Стась П. П. Обоснование безопасности подземной разработки сложноструктурных рудных месторождений в энергонарушенных массивах // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 3. С. 104–119. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-104-119

**For citation:** Golik V. I., Razorenova E. Iu., Stas V. P., Stas P. P. Safety rationale for composite ore deposits underground mining in energy distributed masses. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2022; 3: 104–119 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-104-119