

УДК 622.831; 622.2; 622.235

**ОБОСНОВАНИЕ НОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ
ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ
РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОНВЕРГЕНТНЫМИ ГОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ**

Ю. П. Галченко¹, В. А. Еременко², А. М. Янбеков²

*¹Институт проблем комплексного освоения недр им. акад. Н. В. Мельникова РАН,
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

*²Горный институт НИТУ «МИСИС»,
E-mail: prof.eremenko@gmail.com, Ленинский проспект, 4, 119991, г. Москва, Россия*

Обоснован новый подход к самообрушению руды в условиях применения конвергентных горных технологий. Для решения поставленной задачи на основе определения размера предельного пролета обнажения, в том числе с использованием метода графов устойчивости Метьюза – Потвина, найдены оптимальные условия самообрушения руды в блочном массиве. Рассмотрено конструктивное решение проблемы, основанное на формировании в рабочем слое рудного массива искусственной неоднородности в виде вертикальной щели, а также на изменении углов наклона стенок оконтуривающих и разделительных искусственных массивов. Представлены результаты расчетов потенциальной энергии гравитационного поля Земли, аккумулируемой в пределах свода естественного равновесия, который формируется в массиве в процессе ведения очистных работ.

Энергия гравитационного поля Земли, конвергентные горные технологии, самообрушение горных пород, пролет обнажения, свод естественного равновесия, метод графов устойчивости Метьюза – Потвина, потенциальная энергия

DOI: 10.15372/FTPRPI20220309

Минерально-сырьевой комплекс занимает основополагающее место в индустриальном базисе современной цивилизации. Из недр Земли ежегодно извлекается ~2000 млрд т различных полезных ископаемых с постоянным удвоением этого показателя в среднем через каждые 15 лет. Энергоносители в общем объеме добычи занимают более 22 %. Парадоксальность сложившейся ситуации заключается в том, что основная доля полученной доступной энергии за счет весьма энергоемкого разрушения литосферы затрачивается на добычу энергоносителей. В перспективе эта доля будет возрастать по мере увеличения глубины разработки, усложнения структуры осваиваемых месторождений и снижения их географической и экономической доступности [1–3]. Единственный выход из этого замкнутого круга — первоочередное стимулирование освоения и эксплуатации более чистых альтернативных источников энергии именно в сфере добычи минерального и энергетического сырья из литосферы.

Проведен комплекс теоретических исследований по обоснованию новых возможностей использования энергии гравитационного поля Земли для повышения экономической и экологической эффективности добычи полезных ископаемых с применением конвергентных горных технологий. Выявлено, что использование в горном производстве энергии гравитационного поля Земли происходит в рамках прежней технологической структуры систем разработок, основанных на принудительном обрушении руды [4–9].

На протяжении длительного периода преобладания данных технологий разработки наблюдаются крупномасштабные изменения геофизического состояния литосферы. Попытки преодоления влияния конструктивных элементов систем разработки с принудительным обрушением руды на напряженно-деформированное состояние вмещающего массива привели к развитию технологии разделения всего отбиваемого объема на обрушаемые слои путем последовательного проведения в плоскости условной границы очистного блока горизонтальных выработок, расположенных друг над другом. Это позволяло стабилизировать развитие процесса в горизонтальной плоскости за счет ослабления пяты будущего свода обрушения, но неизбежно создавало неодинаковые граничные условия для развития процесса по высоте блока и кардинально ограничило возможности управления обрушением во времени. При использовании такой схемы дезинтеграция материала в каждом слое развивалась от техногенно ослабленной зоны (пяты свода) к зоне, наиболее упрочненной за счет эффекта саморасклинивания (замку свода). Это приводило к быстрому росту выхода негабарита со всеми вытекающими отсюда техническими проблемами [10–14].

Развитие конвергентных горных технологий с превентивным устранением прямого влияния исходных напряжений [1–3] открыло совершенно новые перспективы коренной модернизации известной технологии отбойки методом самообрушения [10]. Опережающее возведение системы ограждающих и разделительных искусственных массивов кардинально меняет геомеханические и структурные условия, при которых происходит развитие процессов гравитационного разрушения в выемочных единицах. При использовании традиционных решений гравитационная отбойка полезного ископаемого протекает в выемочной единице, дислоцированной в исходном поле напряжений и имеющей континуальную границу со вмещающим горным массивом. В настоящей работе рассматривается использование каркасной геотехнологии, где каждый отрабатываемый блок имеет дискретные внешние границы и располагается в пределах зоны вторичного поля напряжений, сформировавшейся в процессе образования и развития техногенно измененных недр, как новый литосферный объект.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для описания исходного состояния рудного массива использовалась физическая модель сплошной среды, разбитая трещинами на естественные блоки [15, 16]. Оптимальные условия самообрушения: сумма моментов сил нагрузки M_q и бокового распора M_l относительно точки пяты свода равновесия равна нулю. Предельный пролет обнажения рассчитывается по формуле:

$$l_{pr} = 2d_2 \sqrt[3]{\frac{R_2^2}{K d_1 R_1 \gamma}},$$

где d_1 , d_2 — вертикальный и горизонтальный размер единичного блока, м; γ — объемный вес горной породы, кН/м³; R_1 , R_2 — прочность единичного блока в направлении гравитации и бокового распора, кН/м³ [15, 16].

В отличие от традиционных вариантов формирования и развития горнотехнических систем с самообрушением рудного массива, использование каркасных горных технологий основано на идее опережающего возведения в отрабатываемом участке месторождения системы разделительных искусственных массивов с последующей подготовкой, нарезкой и отработкой выделенных таким образом выемочных единиц. Геометрические размеры этих объектов устанавливаются исходя из условий гарантированной геомеханической устойчивости подрабатываемых обнажений, которые определяются с учетом выбранного по требованиям промышленной безопасности коэффициента запаса устойчивости K . Для воспроизводства процесса самообрушения в выемочной единице с фиксированным положением внешнего контура необходимо как минимум увеличить эквивалентную длину пролета до критического значения. Когда сопротивление элементарных блоков горных пород сжатию в направлении действия их веса и в направлении распора одинаково ($R_1 = R_2 = R$, $K = 1$), выражение для l_{pr} принимает вид

$$l_{pr} = 2d_2 \sqrt[3]{\frac{R}{d_1 \gamma}}.$$

При $K > 1$ рабочие размеры выемочной единицы l_f выбираются в соответствии с коэффициентом запаса устойчивости по условию безопасности K :

$$l_f = \frac{1}{\sqrt[3]{K}} 2d_2 \sqrt[3]{\frac{R_2^2}{d_1 \gamma}}.$$

Для воспроизводства процесса самообрушения в выемочной единице с фиксированным положением внешнего контура необходимо увеличить эквивалентную длину пролета до ее критического значения. Тогда перспективную эффективность самообрушения можно оценить через численное значение относительного увеличения размера пролета обнажения массива:

$$\beta = \frac{l_{pr} - l_f}{l_f} = \frac{l_{pr}}{l_f} - 1.$$

Положительное значение $\beta > 0$ соответствует устойчивому состоянию пролета обнажения, в противном случае ($\beta < 0$) происходит его самообрушение. Зависимость длины устойчивого пролета и его относительного увеличения от коэффициента запаса устойчивости по условию безопасности K представлена на рис. 1.

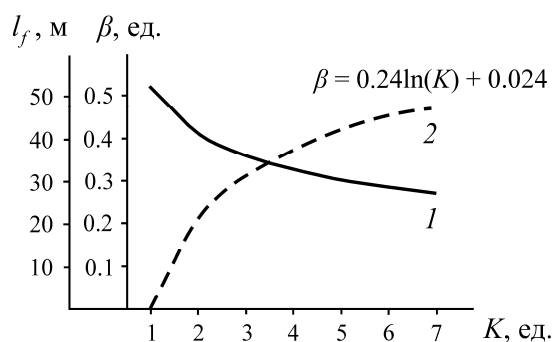


Рис. 1. Зависимость длины устойчивого пролета (1) и относительного увеличения пролета (2) от коэффициента запаса устойчивости

Согласно разработанной проф. В. Н. Родионовым геомеханической модели литосферы как сплошной среды с плотностными неоднородностями, релаксация напряжений от внешних нагрузок происходит на наружном контуре этих неоднородностей, что эквивалентно снижению устойчивости системы [15, 16]. Применительно к решаемой в настоящей работе задаче, это означает, что формирование в рабочем слое рудного массива плотностной неоднородности, например в виде вертикальной щели, эквивалентно увеличению длины подрабатываемого пролета l_f до необходимых по условиям самообрушения l_{pr} значений (рис. 2).

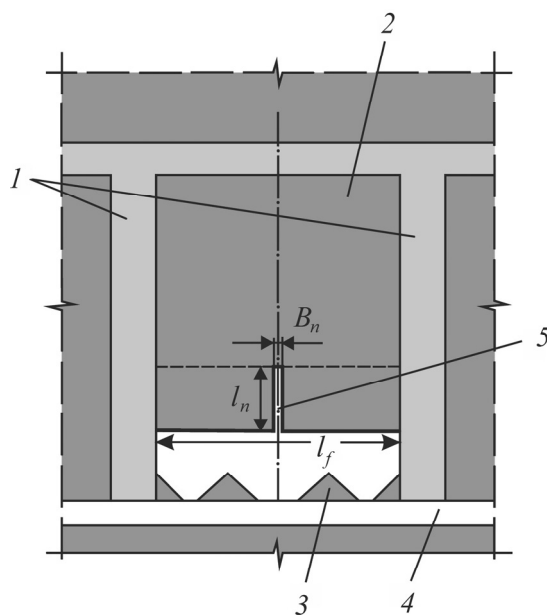


Рис. 2. Схема технологического формирования плотностной неоднородности в выемочной единице каркасной системы: 1 — разделительные искусственные массивы; 2 — выемочная единица; 3 — выработка днища; 4 — этажная выработка; 5 — вертикальная щель; l_n , B_n — глубина и ширина вертикальной щели; l_f — длина пролета обнажения

В каждом конкретном случае для принятых значений l_{pr} и K имеем

$$l_f = \frac{l_{pr}}{1 - \beta}.$$

Тогда минимальная глубина вертикальной щели, необходимая для инициирования процесса самообрушения:

$$l_n = \frac{l_{pr} - l_f}{2}.$$

В данном случае ширина вертикальной щели B_n не влияет на условия самообрушения и выбирается по минимуму затрат на ее формирование.

Оценка устойчивости обнажений очистных камер и выработок, а также конструктивных элементов разрабатываемой конвергентной геотехнологии в вариантах каркасной и сотовой горных конструкций проводилась для горно-геологических и горнотехнических условий подземной разработки 16 рудных месторождений с использованием метода графов устойчивости Метьюза – Потвина [17, 18].

Модифицированный К. Метьюзом рейтинг массива горных пород вычисляется как

$$N = Q'ABC = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} ABC,$$

где Q' — индекс качества породного массива (по методу Бартона); RQD — показатель нарушенности массива. Показатель J_n характеризует количество систем трещин, J_r — шероховатость поверхности стенок трещин, J_a — сцепление поверхностей стенок трещин, коэффициент A учитывает прочность и напряженное состояние горных пород (прочность на сжатие в массиве / касательное напряжение), B — ориентацию систем трещин в пространстве по отношению к обнажению, C — угол падения (наклон) поверхности обнажения.

Для оценки устойчивости обнажения необходимы два параметра — показатель устойчивости N и гидравлический радиус обнажения G_r , т. е. отношение площади к периметру [17, 18]:

$$G_r = \frac{D_b V_o}{2D_b + 2V_o},$$

D_b , V_o — высота и ширина обнажения (пролет) соответственно:

$$V_o = \frac{2D_b G_r}{D_b - 2G_r}.$$

Здесь гидравлический радиус устойчивых и неустойчивых обнажений G_r определялся из графика выделения зон устойчивости Мэтьюза–Потвина (рис. 3) и показателя N , устанавливаемого в процессе ведения экспериментальных работ в условиях рудников. Отметим, что методика и расчеты, сделанные на стадии камеральной обработки результатов экспериментов, качественно калибровались по данным натурных наблюдений за процессами горных работ.

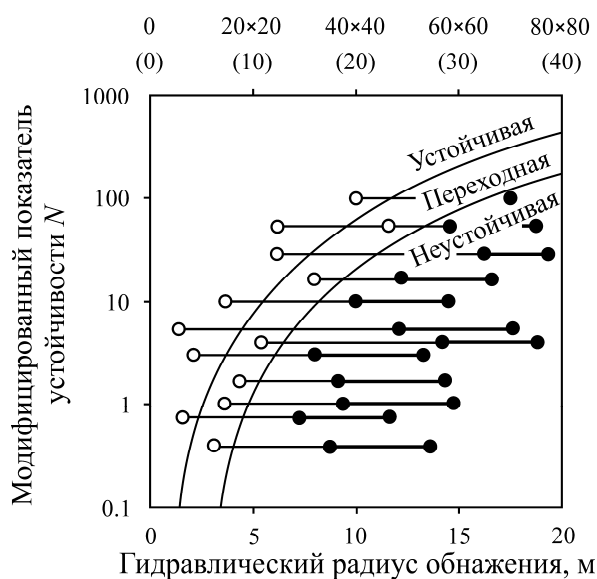


Рис. 3. Диаграмма устойчивости обнажений: 0, 20×20, ..., 80×80 м (длина×ширина), ширина выработки (камеры) 0, 10–40 м; ● — рекомендуемые для самообрушения параметры и диапазон их значений; ○ — устойчивые условия или переходная зона устойчивости

На рис. 3 белые кружки отображают устойчивое состояние обнажения выработки или камеры и определяются при проведении экспериментальных исследований в шахтных условиях. Гидравлический радиус соответствует значению l_f , которое не превышает предельного устойчивого состояния обнажения l_{pr} , а численное значение относительного увеличения размера пролета обнажения массива β положительное. Переходная зона показывает, что обнажение трансформируется из устойчивого состояния в неустойчивое ($\beta = 0$). Черными кружками обозначено неустойчивое состояние обнажения выработки или камеры, при этом создаются необходимые условия самообрушения массива горных пород.

Реализация принципов построения каркасных геотехнологий открывает принципиально новые перспективы и вполне обоснованные возможности для возвращения к идеям использования энергии гравитации при дроблении рудных массивов в процессе разработки месторождений, т. е. к технологии самообрушения руды, которая почти полностью утратила свои позиции.

В рамках предлагаемой технологической концепции открывается реальная возможность перехода от неуправляемого классического самообрушения к управляемому процессу взрыво-гравитационного послонного самообрушения. Здесь взрыв используется только для принудительного инициирования процесса самообрушения в единичном слое ограниченной толщины. В подготовленном и оконтуренном искусственными разделительными массивами очистном блоке высотой H_{el} один размер горизонтального сечения принимают равным расчетной длине свода предельного равновесия, а другой — меньше этого значения. По короткой оси блока на всю его высоту бурят ряд вертикальных скважин. Взрывом нижних концов этих скважин разрушают замок свода равновесия для первого очистного слоя и создают щель на всю его высоту l_n (рис. 2). В результате эквивалентная длина обнажения увеличивается на $2l_n$ и в слое начинается процесс самообрушения руды. После его окончания аналогичным образом запускают самообрушение во всех последующих слоях. Это позволяет контролировать процесс очистной выемки в блоке и создает благоприятные условия для раскрытия трещин высоких порядков в обрушаемом массиве, а также устраняет эффект саморасклинивания, снижающего качество дробления при классическом варианте самообрушения.

Неизбежным следствием формирования такой пространственной каркасной конструкции в объеме обрабатываемого участка при использовании технологии гравитационной отбойки руды является некомпенсированное ослабление пяты свода в каждой выемочной единице до значения прочности контакта между искусственным материалом разделительного целика и рудным массивом. С целью повышения прочности пяты свода и создания благоприятных условий для развития процесса самообрушения рудного массива в каждом слое всем вертикальным искусственным массивам, параллельным одной из взаимно перпендикулярных осей горизонтального сечения обрабатываемого участка, придают форму трапеции с длинным основанием внизу. При этом для оконтуривающих искусственных массивов эта трапеция прямоугольная с вертикальной стороной, расположенной вдоль контура рудного тела, а у разделительных искусственных массивов — равнобедренная. Угол наклона боковых сторон трапецевидных искусственных массивов (рис. 4) определяется через соотношение размеров верхнего и нижнего оснований с высотой обрабатываемой камеры:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h_k}{m' - m},$$

где h_k — высота обрабатываемой камеры; α — угол наклона боковых сторон трапецевидных искусственных массивов.

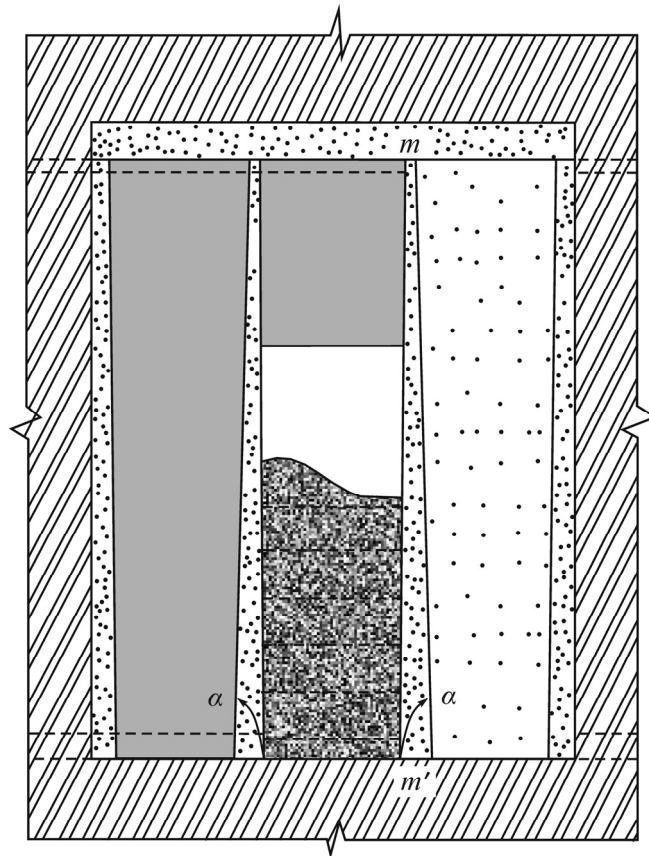


Рис. 4. Общий вид каркасной конструкции с трапециевидными искусственными массивами (вертикальный разрез)

Размер верхнего основания определяется как отношение суммарного веса P_{cv} свода давления и веса части верхнего искусственного ограждающего массива к прочности материала закладки на сжатие σ и к количеству искусственных вертикальных массивов N_i на обрабатываемом участке:

$$m = \frac{P_{cv} + P_{om}}{N_i \sigma}.$$

Размер нижнего основания вычисляется по условию его сдвига через отношение произведения веса рудного массива в выемочном блоке P_p на коэффициент бокового распора λ к прочности материала закладки на сдвиг τ :

$$m' = \frac{P_p \lambda}{\tau}.$$

Угол наклона боковых сторон искусственных массивов находится из выражения

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h_k \sigma \tau N_i}{N_i P_p \lambda \sigma - (P_{cv} - P_{om}) \tau},$$

здесь h_k — высота обрабатываемой камеры, м; σ , τ — предел прочности материала искусственного массива на сжатие и сдвиг, МПа; P_{om} — вес пород в пределах свода естественного равновесия, МН.

При проведении исследований рассчитана потенциальная энергия гравитационного поля Земли, которая аккумулируется в пределах свода естественного равновесия в блочном массиве:

$$E_p = \frac{l}{12} \frac{d_1 R_1}{d_2 R_2} \gamma g h,$$

g — ускорение свободного падения, м/с²; h — высота свода естественного равновесия (обрушаемого слоя), м.

Качество породного массива (индекс Q') непосредственно влияет на его устойчивость и, соответственно, на размеры образующегося свода естественного равновесия. Чем больше Q' (например, для рассматриваемых в таблице условий равный 40), тем устойчивее массив. Представленные в таблице данные получены на основе проведения экспериментальных исследований в шахтных условиях. В ней даны результаты расчетов потенциальной энергии гравитационного поля Земли, которая аккумулируется в пределах свода естественного равновесия, и, для сравнения, энергия взрыва этого же объема рудного массива. Энергии взрыва рассчитывались по классической методике для взрывания скважинных зарядов ВВ с применением аммонита № 6 ЖВ. Установлено, что аккумулированная в пределах свода потенциальная энергия гравитации на несколько порядков ниже, чем энергия взрыва скважинными зарядами взрывчатого вещества такого же объема рудного массива. Отметим, что только малая часть энергии взрыва затрачивается на дезинтеграцию горных пород (коэффициент полезного действия скважинных зарядов ВВ — около 10 %, шпуровых зарядов — 2–3 %), большая часть при этом уходит на образование наведенной трещиноватости, изменение напряженно-деформированного состояния вмещающего массива и т. д. Это в значительной степени ведет к снижению устойчивости массива.

Потенциальная энергия гравитационного поля Земли E_p , аккумулируемая в пределах свода естественного равновесия, и энергия взрыва E_v этого же объема на 1 пог. м массива

Предельный пролет обнажения, м	Качество породного массива Q'	E_p , МДж	E_v , ГДж	E_v / E_p
40	40	22	528	$24.0 \cdot 10^3$
40	20	53	435	$8.2 \cdot 10^3$
40	1	105	326	$3.1 \cdot 10^3$
60	40	49	1181	$24.1 \cdot 10^3$
60	20	117	984	$8.4 \cdot 10^3$
60	1	235	787	$3.3 \cdot 10^3$

ВЫВОДЫ

Теоретическая проработка идей и принципов нового подхода к использованию энергии гравитации Земли для создания оптимальных условий к самообрушению руды в блочном массиве открывает реальную перспективу повышения экономической эффективности, промышленной и экологической безопасности подземной разработки рудных месторождений за счет применения обоснованных решений и изменения параметров конструктивных элементов конвергентных горных технологий. Экспериментально подтвержденный метод оценки устойчиво-

сти обнажений очистных камер и выработок, а также конструктивных элементов геотехнологии с использованием метода графов устойчивости Метьюза–Потвина позволяет эффективно определять на стадии проектирования горных работ рекомендуемые для самообрушения параметры обнажений и диапазон их значений. Для эффективного извлечения руды из выемочных единиц каркасной горной конструкции обоснована трапецевидная форма искусственных массивов, способствующая самозаклиниванию рудного массива в процессе поэтапного самообрушения его слоев. Эффективность и безопасность предлагаемых решений достигается в том числе за счет уменьшения влияния взрыва на вмещающий и закладочный массивы. Как следствие, сохраняется их устойчивость в процессе разработки участков месторождений, а в последующем безопасное поддержание техногенно измененных недр. Разработанные решения можно использовать в условиях применения традиционных систем разработки.

В исследованиях принимали участие старший преподаватель Горного института НИТУ «МИСиС» Н. Г. Высотин, аспиранты, инженеры проекта научно-исследовательского центра «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии» Горного института НИТУ «МИСиС» А. Р. Умаров, Ч. В. Хажыылай, М. А. Косырева и В. И. Лейзер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П. Геозкология освоения недр Земли и экогеотехнологии разработки месторождений. — М.: Научтехлитиздат, 2015. — 360 с.
2. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Vysotin N. G., and Kosyрева M. A. Justification of functional organization and contents of modeling cluster concept for geomechanical research of convergent mining technologies, Eurasian Min., 2021, No. 2. — P. 3–9.
3. Еременко В. А., Галченко Ю. П., Липницкий Н. А., Умаров А. Р. Каркасная горная конструкция при подземной разработке мощных рудных месторождений // Горн. журн. — 2021. — № 9. — С. 11–18.
4. Агошков М. И. Конструирование и расчеты систем и технологии разработки рудных месторождений. — М.: Наука, 1965. — 220 с.
5. Новая технология и системы подземной разработки рудных месторождений: к 60-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР М. И. Агошкова. — М.: Наука, 1965. — 235 с.
6. Еременко А. А., Христолюбов Е. А., Филиппов В. Н., Конурин А. И. Обоснование технологических схем и конструктивных элементов систем разработки слепых рудных тел в окрестности выработанных пространств // Горн. журн. — 2021. — № 9. — С. 22–28.
7. Каплунов Д. Р., Айнбиндер И. И., Федотенко В. С., Юков В. А. Актуальные проблемы подземной добычи руд, проблемы устойчивого развития и перехода к новому технологическому укладу // Горн. журн. — 2021. — № 9. — С. 4–11.
8. Серяков В. М., Риб С. В., Басов В. В., Фрянов В. Н. Геомеханическое обоснование параметров отработки угольных пластов в зоне взаимовлияния очистного пространства и передовой выработки // ФТПРПИ. — 2018. — № 6. — С. 21–29.
9. Noriega R., Pourrahimaian Y., and Ben-Awuah E. Optimisation of life-of-mine production scheduling for block-caving mines under mineral resource and material mixing uncertainty, Int. J. Min., Reclamation and Env., 2022, Vol. 36, No. 2. — P. 104–124.

10. Кузьмин Е. В., Узбекова А. Р. Самообрушение руды при подземной добыче. — М.: МГГУ, 2006. — 276 с.
11. Савич И. Н. Обоснование параметров систем с принудительным обрушением при подземной разработке рудных месторождений // Горн. журн. — 2021. — № 9. — С. 18–20.
12. Tegachouang N. C., Bowa V. M., Li X., Luo Y., and Gong W. Study of the Influence of block caving underground mining on the stability of the overlying open pit mine, Geotech. Geolog. Eng., 2022, Vol. 40, No. 1. — P. 165–173.
13. Castro R., Arancibia L., and Gomez R. Quantifying fines migration in block caving through 3D experiments, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2022, Vol. 151. — 105033.
14. Xia Z.-Y., Tan Z.-Y., and Zhang L. Instability mechanism of extraction structure in whole life cycle in block caving mine, Geofluids, 2021, Vol. 2021. — 9932932.
15. Родионов В. Н. Очерк геомеханика. — М.: Науч. мир, 1996. — 126 с.
16. Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М. Основы геомеханики. — М.: Недра, 1986. — 286 с.
17. Potvin Y. Empirical open stope design in Canada, Thesis PhD., Dept. Min. and Miner. Proc., University of British Columbia, 1988.
18. Хажыылай Ч. В., Еременко В. А., Умаров А. Р., Янбеков А. М. Оценка устойчивости обнажений каркасных горных конструкций по методу Метьюза–Потвина в условиях проектирования соляного рудника // Конф. Междунар. науч. школы акад. РАН К. Н. Трубецкого “Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр”. — М.: ИПКОН РАН, 2020. — С. 172–176.

Поступила в редакцию 22/IV 2022

После доработки 25/IV 2022

Принята к публикации 06/V 2022