

УДК 622.273:65.011.12(088.8)  
DOI: 10.15587/2312-8372.2020.200022

## **ОБОСНОВАНИЕ ПРИРОДООХРАННЫХ И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОГАШЕНИЯ ПУСТОТ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ РУД**

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

## **ОБГРУНТУВАННЯ ПРИРОДООХОРОННИХ І РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОГАШЕННЯ ПОРОЖНИН ПРИ ПІДЗЕМНОМУ ВИДОБУТКУ РУД**

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

## **SUBSTANTIATION OF ENVIRONMENTAL AND RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES FOR VOID FILLING UNDER UNDERGROUND ORE MINING**

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

*Об'єктом дослідження є технологія та технічні засоби для погашення порожнеч під час підземного видобутку руд в масивах, що енергетично порушені. Одним із найбільш проблемних місць є погашення техногенних порожнеч, які впливають на виникнення та перерозподіл напружено-деформаційного стану (НДС) масиву гірських порід. Їх існування в земній корі провокує порушення денної поверхні, а також вплив геомеханічних і сейсмічних явищ, аж до рівня землетрусів.*

*У роботі виконано аналітичні дослідження, порівняльний аналіз теоретичних і практичних результатів за стандартними та новими методиками за участю авторів. Розглянуті особливості прояву гірського тиску в скельних масивах складної будови, зумовлені інтенсивністю розривних структур (акустична жорсткість від 0,11 до 0,18 МПа/с, коефіцієнт ударонебезпеки – 0,98). Досліджено умови прояву залишкової несучої здатності порушених порід і перекладу геоматеріалів у режим об'ємного стиснення (в зоні порушених порід коефіцієнт ослаблення знижується до 0,04–0,15 від початкової величини 0,25–0,35). Показана принципова оцінка стійкості виробок і неоднорідних скельних породах міцністю 50–150 МПа на глибинах до 600 м, що залежить від положення виробок щодо елементів структурної порушеності та можливості створення надійних конструкцій. Зроблено висновки про ефективність використання при погашенні виробленого простору несучих конструкцій із окремістей порід розмірами більше 0,2 м і механічною міцністю понад 50 МПа. Це дозволяє оголювати покрівлю без обвалення при прольотах оголень до 50 м. У разі рівного розподілу напружень в приконтурній зоні та міцності несучого шару*

порід вироблений простір може погашатися ізоляцією або твердіючою закладкою міцністю до 1,2 МПа. 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:** гірський масив, підземна розробка, погашення порожнеч, природоохоронна та ресурсозберігаюча технологія, ефективність горного виробництва.

Об'єктом дослідження є технологія та технічні засоби для погашення порожнеч під час підземного видобутку руд в масивах, що енергетично порушені. Одним із найбільш проблемних місць є погашення техногенних порожнеч, які впливають на виникнення та перерозподіл напружено-деформаційного стану (НДС) масиву гірських порід. Їх існування в земній корі провокує порушення денної поверхні, а також вплив геомеханічних і сейсмічних явищ, аж до рівня землетрусів.

У роботі виконано аналітичні дослідження, порівняльний аналіз теоретичних і практичних результатів за стандартними та новими методиками за участю авторів. Розглянуті особливості прояву гірського тиску в скельних масивах складної будови, зумовлені інтенсивністю розривних структур (акустична жорсткість від 0,11 до 0,18 МПа/с, коефіцієнт ударнебезпеки – 0,98). Досліджено умови прояву залишкової несучої здатності порушених порід і перекладу геоматеріалів у режим об'ємного стиснення (в зоні порушених порід коефіцієнт ослаблення знижується до 0,04–0,15 від початкової величини 0,25–0,35). Показана принципова оцінка стійкості виробок і неоднорідних скельних породах міцністю 50–150 МПа на глибинах до 600 м, що залежить від положення виробок щодо елементів структурної порушеності та можливості створення надійних конструкцій. Зроблено висновки про ефективність використання при погашенні виробленого простору несучих конструкцій із окремістей порід розмірами більше 0,2 м і механічною міцністю понад 50 МПа. Це дозволяє оголювати покрівлю без обвалення при прольотах оголень до 50 м. У разі рівного розподілу напружень в приконтурній зоні та міцності несучого шару порід вироблений простір може погашатися ізоляцією або твердіючою закладкою міцністю до 1,2 МПа. 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:** гірський масив, підземна розробка, погашення порожнеч, природоохоронна та ресурсозберігаюча технологія, ефективність горного виробництва.

## 1. Введение

Показатели эффективности подземной разработки месторождений сложной структуры зависят от целенаправленного использования свойств рудовмещающих массивов и техногенных условий [1, 2]. Одним из основных вопросов эксплуатации таких месторождений является выбор параметров погашения

пустот, образованных выемкой сырья, обеспечивающих сохранность земной поверхности в районе разработок [3, 4]. Они залегают в неоднородных скальных массивах сложной структуры, поведение которых имеет свои особенности, определяющие экономические, экологические и социальные последствия техногенного вмешательства в природную среду [5, 6].

Поэтому обоснование природоохранных и ресурсосберегающих технологий погашения пустот при подземной добыче руд – важная научная, практическая и социальная задача, требующая оперативного решения [7, 8]. Это достигается установлением закономерностей проявления горного давления массива горных пород для обеспечения жизнедеятельности населения, проживающего в зонах влияния горнодобывающих регионов [9, 10]. Данная работа является продолжением исследований, основные научные и практические результаты которых наиболее полно приведены в работе [11].

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

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

## **3. Цель и задачи исследования**

*Цель исследования* – обоснование природоохранных и ресурсосберегающих технологий погашения пустот при подземной добыче руд. Это позволит обеспечить сохранность дневной поверхности и жизнедеятельность населения, проживающего в зоне влияния горнодобывающего региона.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

1. Установить особенности проявления горного давления в скальных массивах сложного строения, обусловленные интенсивностью разрывных структур.
2. Определить условия проявления остаточной несущей способности нарушенных пород и перевода геоматериалов в режим объемного сжатия.
3. Показать, от чего зависит устойчивость выработок в неоднородных скальных породах прочностью 50–150 МПа на глубинах до 600 м.
4. Оценить горно-геологические условия скальных месторождений в энергонарушенных массивах, позволяющих обнажать кровлю пустот без обрушения либо погашать их изоляцией или малопрочной твердеющей закладкой.

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

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, 6] 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.

Анализ состояния и движения 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 1 обрушение, а на глубине 300–400 м их было уже 25. На шахте им. Коминтерна (Кривбасс, Украина) на глубине 300–400 м было 8 обрушений, а на глубине 600–700 м достигло 35 [7, 8]. 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 [9, 10]. На этой основе предложены новые природоохранные и ресурсосберегающие технологии и технические средства погашения пустот, которые дали положительные результаты при подземной разработке рудных месторождений Украины, Российской Федерации, Республики Казахстан и других развитых горнодобывающих стран мира [12, 13].

Таким образом, результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что важным для решения вопроса является образование техногенных пустот, которые влияют на возникновение и перераспределение НДС массива горных пород. Их существование в земной коре провоцирует нарушение дневной поверхности, а также влияние геомеханических и сейсмических явлений, вплоть до уровня землетрясений [14, 15].

## **5. Методы исследований**

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

– технологии и технических средств погашения пустот при подземной добыче руд в энергонарушенных массивах;

– подземной геотехнологии;

– теории и практики взрывного разрушения твердых сред.

На моделях из эквивалентных и оптически активных материалов:

– изучалось влияние нарушенности пород на устойчивость выработок, изменение величины и форм проявления горного давления с глубиной работ;

– устанавливались зависимости деформированно-напряженного состояния нарушенных пород от размеров выработок.

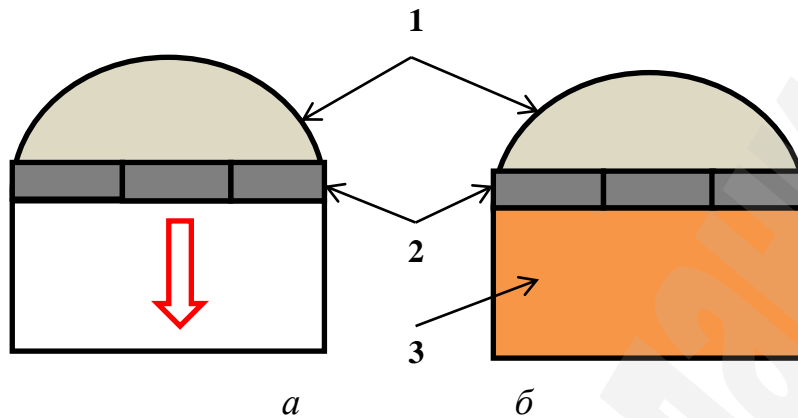
Также были использованы методы механики сплошных сред, математической статистики и методы исследования волновых процессов по стандартным и новым методикам ведущих специалистов развитых горнодобывающих стран мира с участием авторов.

## **6. Результаты исследования**

### **6.1. Исследование механизма развития напряжений и деформаций в зоне влияния подземных пустот**

В практике технологии и технических средств погашения пустот при подземной добыче руд в энергонарушенных массивах наиболее распространены следующие способы (рис. 1).

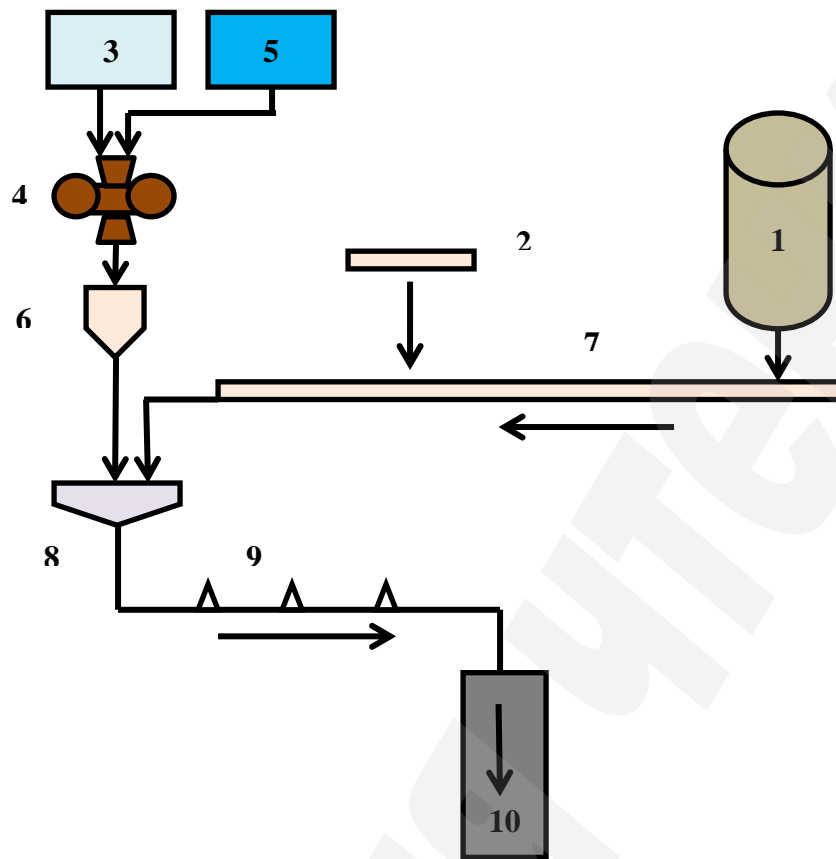
*Погашение обрушением вмещающих пород* является наиболее распространенным способом, что объясняется простотой организации работ, высокой степенью механизации и малой затратностью. К его недостаткам относятся трудности контроля полноты заполнения пустот и управления процессом обрушения при уменьшении мощностей рудных тел на глубинах более 500–600 м. При отработке месторождений на больших глубинах возникает необходимость перехода на другие технологии погашения пустот. Способ характеризуется значительными потерями и разубоживанием и разрушением массива до поверхности. Вместе с тем, при разработке рудных залежей под рыхлыми отложениями, влажные суглинки, попадая в добытую руду, усложняют, а иногда и нарушают процесс отсортировки пустых пород и некондиционных руд. Они затрудняют также работу рудничного транспорта, питателей, дозаторов и скипового подъема. Отмеченные недостатки значительно снижают эффективность применения данного способа погашения подземных пустот при разработке месторождений весьма ценных руд.



**Рис. 1.** Условие безопасности обрушения пород: *а* – открытое выработанное пространство; *б* – заложенное твердеющей смесью выработанное пространство; 1 – зона обрушения; 2 – несущий слой; 3 – твердеющая смесь

*Погашение изоляцией пустот* перемычками без заполнения материалом применяется при отработке рудных тел малой и средней мощности, фланговых и слепых рудных тел, не оказывающих влияния на подземные объекты и земную поверхность. В качестве основного этот способ применяется на некоторых месторождениях Республики Киргизстан, Республики Казахстан, США, ЮАР и других горнодобывающих странах. Достоинства способа составляют минимальные затраты, сравнительно небольшие потери и разубоживание, доступность для контроля, сохранность вмещающего массива и земной поверхности. К особенностям технологии относится повышенное требование к полноте представлений о массиве, более детальная его изученность и постоянный геомеханический и сейсмический мониторинги [16, 17].

*Погашение твердеющей закладочной смесью* обеспечивает лучшие показатели эксплуатации недр (рис. 2). Основной объем пустот закладывают смесями при одновременной отработке открытым и подземным способом мощных крутопадающих рудных тел месторождений, локализованных в интенсивно-нарушенных породах средней устойчивости. В последнее время закладка приготавливается с заменой цемента измельченными вяжущими в смеси с песчано-гравийными материалами. Прочность закладки изменяется в широких пределах, в зависимости от назначения искусственных массивов. На ряде месторождений твердеющую закладочную смесь применяют из-за необходимости сохранения земной поверхности по экологическим условиям и повышения безопасности жизнедеятельности в горнодобывающих регионах.

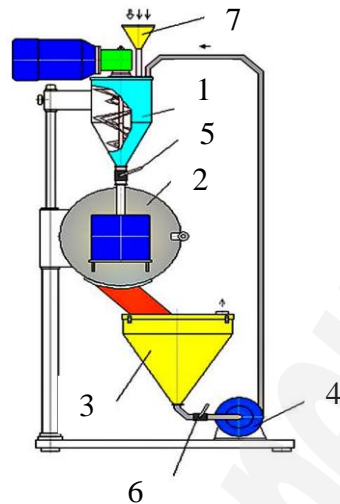


**Рис. 2.** Схема активации компонентов твердеющих смесей при их изготовлении и транспортировании: 1 – бункер цемента; 2 – виброгрохот инертных заполнителей; 3 – доменный шлак; 4 – дезинтегратор-активатор ДУ-65 (фирма «Дезинтегратор», Эстония); 5 – активированная вода затворения; 6 – вибромельница вертикальная МВВ-0,7 (Украина); 7 – конвейер; 8 – смеситель; 9 – вибраторы; 10 – камера блока

Технологии с закладкой пустот твердеющими смесями занимают приоритетные позиции при подземной разработке месторождений полезных ископаемых, в любых условиях обеспечивая сохранность объектов эксплуатации, безопасное ведение горных работ, полноту использования и охрану недр, и окружающей среды. Основным инструментом активации ингредиентов твердеющей смеси является дезинтегратор, создающий при воздействии на вещество скорость удара на порядок больше, чем в вибрационных и шаровых мельницах и ускорение в миллионы ускорений свободного падения [18, 19]. Активация руд в дезинтеграторе является элементом комбинирования технологий выщелачивания металлов из некондиционного сырья, увеличивая извлечение металлов и ускоряя процессы выщелачивания металлов. Дезинтеграторная технология обеспечивает приращение активности вяжущих на величину до 40 % [20, 21].

Исследование параметров единого процесса переработки хвостов обогащения руд – механической активации в дезинтеграторе с химическим выщелачиванием осуществлено в установке DESI-11 (Россия), изготовленной Закрытым

акционерным обществом Гефест-Центром прикладной механохимии, г. Санкт-Петербург, Россия (рис. 3). Активация компонентов смеси на вибрационном грохоте, в дезинтеграторе и вибрационном трубопроводе с активацией воды путем осаждения солей и примесей расширяет пределы использования прогрессивных технологий с закладкой твердеющими смесями [22, 23].

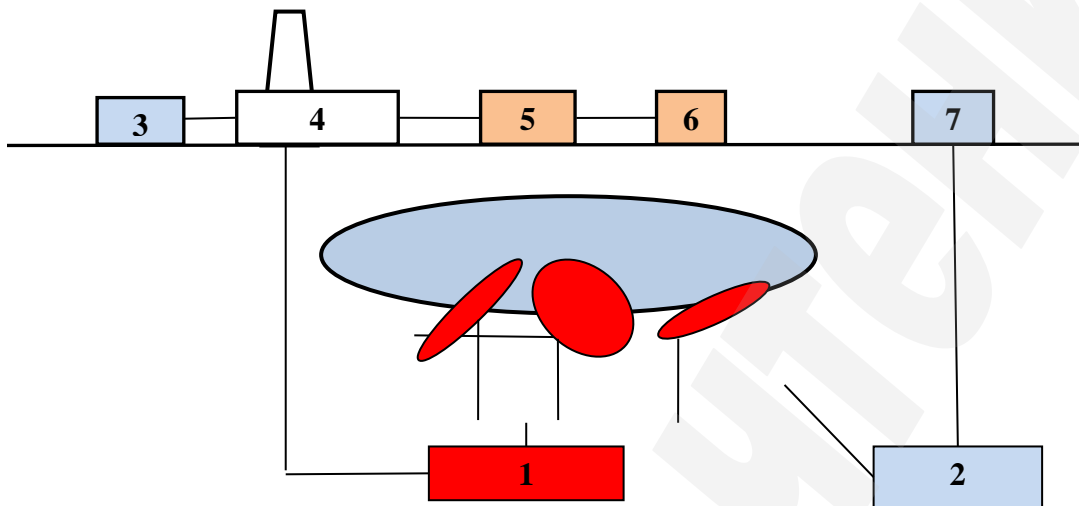


**Рис. 3.** Схема лабораторного дезинтегратора DESI-11 для активации и выщелачивания минералов: 1 – смеситель; 2 – дезинтегратор; 3 – приемный бункер; 4 – насос; 5, 6 – кран; 7 – воронка

*Комбинированное погашение пустот* при разработке рудных месторождений подземным блочным выщелачиванием (ПБВ) находит применение в развитых горнодобывающих странах мира (рис. 4). При двухстадийной отработке руды опорное давление перераспределяется на камеры второй очереди, а нагрузка на конструкции определяется массой пород внутри возникшего свода естественного равновесия пород. Нарушенные породы в пределах свода деформируются, но могут образовать прочную конструкцию и не препятствовать процессу выщелачивания [24, 25]. Перспективны геотехнологии, при которых на дневную поверхность выдаются богатые руды, а остальная руда перерабатывается на месте залегания. Геохимические технологии выщелачивания металлов предусматривают подачу выщелачивающего раствора (в данном случае – это низкоконцентрированные растворы серной кислоты, то есть эрзац-кислоты) на рудосодержащий материал. А также подготовку приемного горизонта в виде днища, подготовленного и заиленного глинистым раствором под углом 5–6° в сторону сбора продуктивного раствора. Время выщелачивания металла составляет до 6 мес. После чего, продуктивный раствор собирают в емкости и направляют для последующей и более полной переработки на гидрометаллургическом заводе (ГМЗ). А выщелоченный материал оставляют в



отработанных камерах в качестве закладочного материала прочностью до 1,2 МПа и промывают водой через действующую оросительную систему для снижения попадания в геологическую среду вредных веществ (табл. 1).



**Рис. 4.** Комбинированная разработка рудного месторождения:  
 1, 2 – соответственно, богатые и бедные по содержанию полезного компонента руды; 3 – комплекс кучного выщелачивания бедных и забалансовых руд; 4, 5 – соответственно, рудо-контрольная и обогатительная станция (РКС) и фабрика (РОФ); 6 – закладочный комплекс; 7 – цех приготовления выщелачивающих растворов

**Таблица 1**

Типизация процессов подземного блокового выщелачивания руд

Процессы	Параметры процессов	Условия реализации процессов
1	2	3
Дробление руды	Обеспечение крупности + 20–50 мм	Равномерная плотность руды. Возможность создания компенсационного пространства для взрыва
Орошение руды	Скважины в нетронутым массиве. Разбрызгивание с поверхности руды. Скважины в разрушенной руде с обсадкой. Использование мелкозернистых материалов. Гидравлический разрыв пород	Отсутствие непроницаемых зон и каналов в отбитой руде

**Продолжение таблицы 1**

1	2	3
Сбор продукционных растворов	Противофильтрационные завесы. Гидроизоляция участков выщелачивания. Электровакуумный дренаж растворов. Использование синтетических полимерных материалов	Исключение попадания продуктов выщелачивания в окружающую среду
Интенсификация процесса	Физические методы: нагнетание сжатого воздуха, взрывание руд, уменьшение крупности пропорционально градиенту концентрации, отбойка слоями с переменной линией наименьшего сопротивления, придание формы эллипсоида выпуска, ультразвуковые колебания, электромагнитная обработка растворов. Химические методы: промывка водой с активизирующими добавками, введение химических составов. Биологические методы: использование штаммов бактерий	Получение заданного разрыхления. Увеличение содержания в растворе до приемлемого значения
Контроль полноты выщелачивания	Скважинные методы: бурение по породе для введения контролирующих устройств, бурение по отбитой руде с отбором проб. Проходка выработок с отбором проб	Представительности проб и измерений для всего блока

Разработка рудных месторождений ПБВ предполагает создание в энергонарушенных массивах участков с породами разной прочности:

- блоки заполнены рудным материалом, который подвижен и склонен к слеживанию;
- блоки характеризуются водонасыщенностью и ослаблением прочности пород;
- в процессе выщелачивания минеральные частицы перемещаются.

Создание таких участков провоцирует рост растягивающих напряжений и нагрузки на элементы природно-техногенной системы [26, 27]. Сбалансированное состояние рудовмещающего массива обеспечивается, если блоки ПБВ разгружены от критических напряжений искусственными и естественными массивами. В пределах эксплуатационного блока богатая руда в объеме около 40 % от запасов извлекается и выдается на земную поверхность, а остальная выщелачивается в блоке ПБВ. Вопросам сохранения массивов отвечает выщелачивание без разрушения массива за счет нагнетания реагентов под большим давлением в верхней части ПБВ и сбор продуктивных растворов в выработках днища блока.

## **6.2. Практика подготовки запасов руды к ПБВ**

Для рудных залежей Мичуринского месторождения (г. Кропивницкий, Украина) угол падения между осями 78–80 изменяется от 57° до 60°. По

восстанию она расположена между гор. 255 и 202 м. Подготовка и нарезка рудной залежи осуществляется для одного и более эксплуатационных блоков. Проходятся подэтажные буровые и подходные выработки по рудному телу и в лежащем боку залежи, восстающие, соответственно, вентиляционно–ходовой, перепускной для горнорудной массы и грузовой, отрезной восстающей для формирования отрезной щели (компенсационного пространства) и выработки днища блока для сбора продуктивных растворов. На гор. 210 м монтируются сорбционная колонна, емкость для приема сорбента, магистральный трубопровод и оросители для подачи выщелачивающего раствора на замагазинированную руду в камере ПБВ.

Комбинированное управление геомеханикой энергонарушенных массивов применяют при добыче разносортных руд, например, после выемки богатых руд, а бедные руды дорабатывают в блоках ПБВ [28, 29]. Геомеханическая сбалансированность массива обеспечивается разделением его на предельные по условию образования свода естественного равновесия и сохранения плоской кровли участки (рис. 5). Внутри обособленных участков могут применяться различные технологии подземной добычи руд. Защита сопряженных участков месторождения от сейсмического воздействия взрыва взрывчатого вещества (ВВ) производится, например, экранированием.

Уровень напряжений в геомеханической системе регулируется инженерными мероприятиями:

- наклон искусственного массива на рудный массив снижает разубоживание руды закладкой;

- предохранительный закладочный массив на границе рудной залежи представляет собой защитную стенку, позволяя извлекать основные запасы в благоприятных горнотехнических условиях;

- упрочнение неустойчивых пород анкерами и стальными канатами обеспечивает лучшие показатели извлечения руд.

Таким образом, анализ ретро- и перспектив развития способов погашения пустот при разработке месторождений показывает:

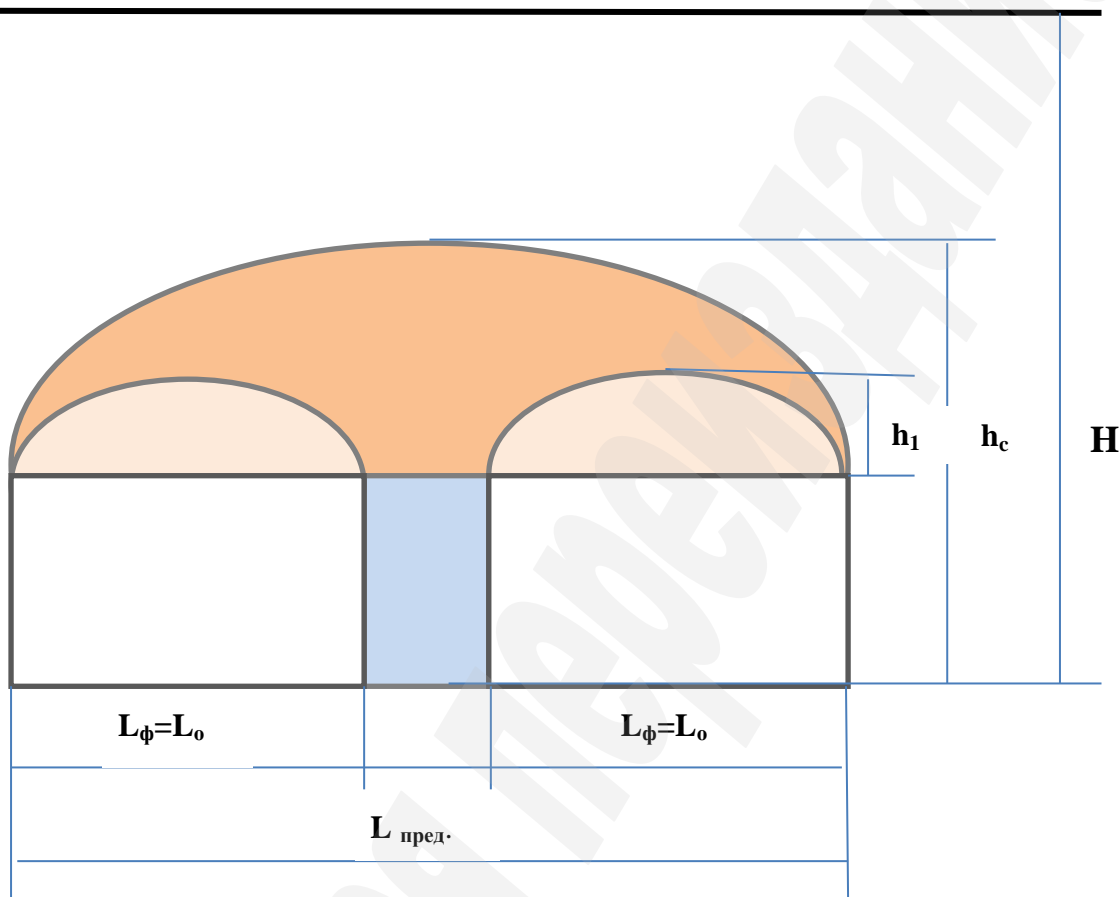
- развитие природо- и ресурсосберегающих тенденций ограничивает, вплоть до полного запрещения, область применения способа погашения с обрушением пород;

- распространение способа погашения изоляцией ограничивается условиями локализации рудных тел и в качестве основного этот способ может быть применен в исключительных случаях. В качестве вспомогательного способа его область применения увеличивается;

- ограничивающим фактором для увеличения области применения твердеющих закладочных смесей является дефицит вяжущих и качественных заполнителей, что усиливает необходимость вовлечения в сферу производства отходов производства и местных некондиционных минеральных ресурсов типа суглинков и супесей;

- выбор параметров погашения требует углубления знаний о закономерностях управления массивами комбинированным погашением:

твердеющими закладочными смесями и изоляцией, а также технико-технологического обеспечения процессов погашения с использованием природо- и ресурсосберегающих технологий [30, 31].



**Рис. 5.** Схема к разделению массива на геомеханически безопасные участки:

$L_{пред.}$ ,  $L_\phi$ ,  $L_o$  – соответственно, предельный по условию образования свода естественного равновесия пролет, фактической и плоской кровли;  $H$  – глубина работ;  $h_c$  – высота свода естественного равновесия предельного пролета;  $h_1$  – высота нового свода

### 6.3. Результаты внедрения

Следующие инструкции для Государственного предприятия «Восточный горно-обогатительный комбинат» (ГП «ВостГОК», г. Желтые Воды, Украина):

- «Инструкция по обоснованию безопасных и устойчивых параметров очистных блоков на шахтах ГП «ВостГОК»;
- «Инструкция по обоснованию безопасного ведения горных работ и порядка отработки рудных залежей на шахтах ГП «ВостГОК»;
- «Инструкция по оперативному контролю и прогноза напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и руд на шахтах

ГП «ВостГОК» были составлены по результатам многолетних исследований, выполненных в 1970–2019 годах такими организациями, как;

– Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии» (ГП «УкрНИПИИпромтехнологии», г. Желтые Воды, Украина) и Государственное предприятие «Научно-исследовательский горнорудный институт» (ГП «НИГРИ», г. Кривой Рог, Украина);

– Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела (АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Россия), а также с учетом передового опыта в развитых горнодобывающих странах мира.

В инструкциях изложены методы расчетов и представлены номограммы по определению безопасных и устойчивых обнажений горных и искусственных массивов очистных блоков, допустимых объемов техногенных пустот отработанных, частично погашенных и изолированных выработанных пространств. А также сейсмобезопасной массы зарядов и их влияние на безопасное ведение горных работ в интервале глубин 300–1000 м при отработке рудных месторождений камерными системами разработки с закладкой выработанного пространства на шахтах Украины. Приведены зависимости безопасных и устойчивых параметров очистных блоков от горно-геологических и горнотехнических условий, физико-механических свойств горных пород и искусственных массивов и времени стояния обнажений выработанных пространств. Описаны условия безопасного ведения горных работ, порядок определения размеров опасных зон и хрупкого разрушения горных пород, подверженных НДС. Сформулированы критерии оценки интенсивности и механизмов проявления горного давления в зависимости от уровня НДС и деформационной характеристики пород [32, 33].

Экспериментальное освоение новых технологий активации компонентов твердеющих смесей при подземной добыче руд проведено на АО «Целинный горно-химический комбинат» (г. Степногорск, Республика Казахстан). Результаты позволяют заключить, что комплексирование методов активации ингредиентов смеси обладает рядом преимуществ, главными из которых являются возможность увеличения сырьевой базы, повышение коэффициента полноты ресурсов недр возможность доставки смеси на расстояние, значительно превышающее предельное для традиционных технологий. Это позволяет отказаться от строительства новых закладочных комплексов. Эффективность приготовления и транспортирования твердеющих смесей на дальние расстояния определяется взаимодействием не только известных факторов, но и наложением на них фактора активации. При использовании новой технологии повышается полнота использования недр, сохраняется земля для сельскохозяйственного производства и снижается нагрузка на окружающую среду за счет ликвидации опасности хранения химически опасных хвостов обогащения металлических руд.

Таким образом, применение вибро-, механо- и электроактивации компонентов твердеющей закладочной смеси на горных предприятиях приводит к повышению активности некондиционных материалов на величину до 10–40 % для каждого аппарата. В частности, обогащение инертных материалов на виброгрохоте ГВ-1,2/3,2 (Украина) увеличивает активность на 15–20 %. Активация вязущих материалов (доменных гранулированных шлаков) в дезинтеграторе ДУ-65 – на 20–25 %, при выходе активного класса фракций крупностью 0,074 мм – на 55 % против 40 % в шаровых мельницах. Для вертикальной вибромельницы МВВ-0,7 – на 15–20 %, при выходе активного класса фракций крупностью 0,074 мм – до 70 %. Вибротранспортные установки увеличивают активность на 10–15 %, а электродиализные аппараты для активации воды затворения увеличивают активность на 30–40 %. Применение установок вибросамотечного транспорта обеспечивает подачу закладочной смеси на расстояние, в 15–20 раз превышающее высоту вертикального става [34, 35].

#### **6.4. Эколого-экономическая эффективность горного производства**

Основным критерием эффективности погашения является себестоимость погашения в расчете на 1 м<sup>3</sup> погашенных пустот. Наименьшими затратами отличается способ погашения с обрушением пород и разрушением земной поверхности, который принят при разработке большинства месторождений Кривбасса (г. Кривой Рог, Украина). Такой подход не является объективным, потому что обрушение неразрывно связано с разрушением массива, земной поверхности и потерей части сырья. Подсчитать ущерб от этого не представляется возможным. Действительная ценность 1 га отвлекаемых у сельского хозяйства земель не отвечает той стоимости, которая выплачивается владельцу земли в качестве компенсации. Стоимость одной единицы потерянного металла нестабильна и может многократно увеличиваться уже в ближайшее время. В особенности это относится к урановому сырью и редкоземельным элементам. Поэтому при сравнении себестоимости погашения без учета действительного ущерба допускаются систематические ошибки. В качестве критерия выбора оптимального способа погашения авторы приняли минимальную приведенную стоимость погашения при условии сохранения земной поверхности над разрабатываемым массивом с учетом наносимого (или предотвращаемого) ущерба окружающей среде и затрат на защиту населения, проживающего в зоне влияния горных предприятий (добывающих и перерабатывающих), согласно аналитической модели Голика-Ляшенка [36, 37]:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{\phi} \leq L_0 = 1,71 \cdot \sqrt[3]{\frac{10R_{см} d_{o2}^2}{K_2 \gamma}} \leq L_{гран}; \quad L_{\phi} \leq L_n = 1,49 \cdot d_{б2} \sqrt{\frac{10R_{см} d_{o2}^2}{K_2 \cdot \gamma \cdot b}} \leq L_{гран}; \\ L_{\phi} \leq L_3 = 2,98 \cdot d_{б2} \cdot \sqrt{\frac{10R_{см} d_{o2}^2}{K_2 \gamma}} \leq L_{гран}; \quad H > h_c = \frac{L_{гран} \cdot d_1}{2 \cdot d_2}; \\ K_2 = \frac{20R_{см} \cdot d_1}{(L_{гран} + 2d_1)H} > 1; \quad \Pi_i = \sum_{i=1}^n (C_{dp} - C_{dp} \pm Y + Z_n) \cdot \frac{1}{1 + E^{t-1}} \cong max, \end{array} \right.$$

где  $L_{\phi}$ ,  $L_0$ ,  $L_n$ ,  $L_3$ ,  $L_{гран}$  – соответственно, фактический, незакрепленный, закрепленный и граничный (предельный) пролеты основной и непосредственной кровель, м;

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

$d_{o2}$ ,  $d_{б2}$  – вертикальный размер структурных блоков основной и непосредственной кровель, м;

$K_2$  – коэффициент запаса, ед.;

$\gamma$  – плотность пород, т/м<sup>3</sup>;

$d_1$ ,  $d_2$  – размер структурных блоков, соответственно, по горизонтали и вертикали, м;

$b$  – мощность непосредственной кровли, м;

$H$  – глубина работ, м;

$h_c$  – высота зоны ослабления пород, м;

$\Pi_i$  – прибыль, получаемая от освоения запасов руды;

$C_{dp}$  – суммарная ценность конечной продукции из металлосодержащих руд, денежных ед.;

$C_{dp}$  – суммарные затраты на добычу и получения конечной продукции, денежных ед.;

$B$  – суммарный ущерб, наносимый (–) окружающей среде или предотвращающий (+) с учетом затрат на защиту населения, проживающего в зоне влияния горных предприятий ( $Z_n$ ), денежных ед.;

$E$  – коэффициент дисконтирования затрат и прибыли во времени  $t$  применения оцениваемой технологии, доли ед.

Таким образом, анализ последствий применения этого критерия показывает, что исключается погашение пустот с обрушением пород и создаются предпосылки развития способов управления массивом. Это условие приемлемо для большинства месторождений руд полиметаллических, цветных, редкоземельных, радиоактивных металлов, расположенных в районах развитого сельского хозяйства и под охраняемыми объектами. Оценка научных основ и практики погашения пустот при разработке рудных месторождений Российской Федерации,

Республики Казахстан, Украины и других развитых горнодобывающих стран показывает, что:

- условием эффективности управления горными массивами при их подработке является геомеханическая сбалансированность напряженно-деформированных дискретных сред;

- перспективные способы управления массивами связаны с использованием остаточной несущей способности структурных отдельностей, слагающих их при переводе в режим объемного сжатия.

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

*Strengths.* На основе исследования механизма возникновения и перераспределения НДС массива пород с использованием геофизических и маркшейдерских методов предложена природоохранная технология погашения пустот в энергонарушенных массивах. Она позволяет обеспечить сохранность дневной поверхности и жизнедеятельность населения, проживающего в зоне влияния горных объектов. К ним относятся 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 сохранность дневной поверхности и 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 обогащения), 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 обогащения), 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 для промышленности в металлах. А также снижению загрязнения окружающей среды в развитых горнодобывающих странах мира [38, 39].

*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 [11, 40].

## **8. Выводы**

1. Установлены особенности проявления горного давления в скальных массивах сложного строения, обусловленные интенсивностью разрывных структур. Показано, что акустическая жесткость от 0,11 до 0,18 МПа/с, коэффициент удароопасности – 0,98.

2. Определены условия проявления остаточной несущей способности нарушенных пород и перевода геоматериалов в режим объемного сжатия. Так, в зоне нарушенных пород коэффициент ослабления снижается до 0,04–0,15 с первоначальной величины 0,25–0,35. Горизонтальные напряжения в массивах в 5 раз превышают вертикальные, что подтверждает интенсивную тектонику месторождений.

3. Показано, что устойчивость выработок в неоднородных скальных породах прочностью 50–150 МПа на глубинах до 600 м зависит от положения выработок относительно элементов структурной нарушенности и возможности создания надежных конструкций.

4. Доказано, что использование при погашении выработанного пространства несущих конструкций из отдельностей пород размерами более 0,2 м и механической прочностью более 50 МПа позволяет обнажать кровлю без обрушения при пролетах обнажений до 50 м. При равенстве напряжений в

приконтурной зоне и прочности несущего слоя пород выработанное пространство может погашаться изоляцией или твердеющей закладкой прочностью до 1,2 МПа.

### **Благодарность**

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

– ГП «УкрНИПИИпромтехнологии» и ГП «ВостГОК» (г. Желтые Воды, Украина);

– Национального технического университета «Днепровская политехника» и Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), г. Днепр, Украина;

– Государственного высшего учебного заведения «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог, Украина.

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

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

### **References**

1. Protodiakonov, M. M. (1933). *Davlenie gornykh porod i rudnichnoe kreplenie. Ch. 1. Davlenie gornykh porod*. Moscow, Leningrad: Novosibirsk: Gosgortekhzdat, Ch. 1, 128.
2. Slesarev, V. D. (1948). *Opredelenie optimalnykh razmerov tselikov razlichnogo naznacheniia*. Moscow, Leningrad: Ugletekhizdat Zapaduglia, 195.
3. Borysov, A. A. (1948). *Davlenye na krep horyzontalnykh vyrabotok*. Moscow; Leningrad: Ugletekhizdat, 104.
4. Vetrov, S. V. (1975). *Dopustimye razmery obnazhenii gornykh porod pri podzemnoi razrabotke rud*. Moscow: Nauka, 223.
5. Borisov, A. A. (1980). *Mekhanika gornykh porod*. Moscow: Nedra, 359.
6. Fisenko, G. L. (1980). *Predelnoe sostoianie gornykh porod vokrug vyrabotok*. Moscow: Nedra, 359.
7. Sleptsov, M. N., Azymov, R. Sh., Mosynets, V. N. (1986). *Podzemnaia razrabotka mestorozhdenyi tsvetnykh y redkykh metallov*. Moscow: Nedra, 206.
8. Avdeev, O. K., Pukhalskii, V. N., Razumov, A. N. (1989). Otrabotka zapasov rudy v zone predokhranitel'nogo tselika pod vodoemom. *Gornyi zhurnal*, 9, 28–30.
9. *Instruktsiia po bezopasnomu vedeniiu gornykh rabot na rudnykh i nerudnykh mestorozhdeniakh (obektakh stroitelstva podzemnykh sooruzhenii), sklonnykh k gornym udaram* (1989). Leningrad: VNIMI, 58.
10. Povnyi, B. E., Golik, V. I., Liashenko, V. I. (1991). Upravlenie pogasheniem tekhnogennykh pustot. *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal*, 8, 24–30.
11. Lyashenko, V., Khomenko, O., Topolnij, F., Golik, V. (2020). Development of natural underground ore mining technologies in energy distributed massifs. *Technology*

*Audit and Production Reserves*, 1 (3 (51)), 17–24. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372.2020.195946>

12. Shtele, V. I. (1991). *Stend dlia modelirovaniia geomekhanicheskikh protsessov v tolsche gornyykh porod*. Avtorskoe svidetelstvo 1682559 A1 (SSSR).

13. Liashenko, V. I., Golik, V. I., Razumov, A. N., Trapenok, N. M. (1992). *Prirodo- i resursosberegaiushchie tekhnologii podzemnoi razrabotki rudnykh mestorozhdenii*. Moscow: Chermetinformatsiia, 103.

14. Liashenko, V. I., Golik, V. I., Kolokolov, O. V. (1994). *Sozdanie i vnedrenie prirodo- i resursosberegaiushchikh tekhnologii podzemnoi razrabotki mestorozhdenii slozhnoi struktury*. *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal*, 4, 31–37.

15. Chernova, A. P. (Ed.) (2001). *Dobycha i pererabotka uranovykh rud*. Kyiv: Adef-Ukraina, 238.

16. Liashenko, V. I. (2015). Nauchno-tekhnicheskie predposylki povysheniia ekologicheskoi bezopasnosti v gornodobyvaiuschem regione. *Biul. Chernaia metallurgii*, 1, 21–30.

17. Liashenko, V. I., Pukhalskii, V. N. (2015). Justification of chamber safety parameters in underground working of surface reserves of deposits under protected sites. *Izv. vuzov. Gornyi zhurnal*, 3, 37–49.

18. Komashchenko, V. I., Vasilev, P. V., Maslennikov, S. A. (2016). Dependable raw materials base for underground mining the KMA deposits. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2, 101–114.

19. Dmitrak, Y. V., Kamnev, E. N. (2015). The Leading Research and Design Institute of Industrial Technologies – A long way in 65 years. *Gornyi Zhurnal*, 3, 6–12. doi: <http://doi.org/10.17580/gzh.2016.03.01>

20. Golik, V., Komashchenko, V., Morkun, V., Zaalishvili, V. (2015). Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies. *Metallurgical and Mining Industry*, 7 (4), 325–329.

21. Golik, V. I., Rasorenov, Y. I., Efremkov, A. B. (2014). Recycling of Metal Ore Mill Tailings. *Applied Mechanics and Materials*, 682, 363–368. doi: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.682.363>

22. JianPing, Y., WeiZhong, C., DianSen, Y., JingQiang, Y. (2015). Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling. *Computers and Geotechnics*, 64, 20–31. doi: <http://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.10.011>

23. Dold, B., Weibel, L. (2013). Biogeometallurgical pre-mining characterization of ore deposits: an approach to increase sustainability in the mining process. *Environmental Science and Pollution Research*, 20 (11), 7777–7786. doi: <http://doi.org/10.1007/s11356-013-1681-2>

24. Eremenko, V. A., Lushnikov, V. N. (2018). Procedure for selecting dynamic ground support for rockbursting mining conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 12, 5–12. doi: <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-5-12>

25. Reiter, K., Heidbach, O. (2014). 3-D geomechanical–numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada). *Solid Earth*, 5 (2), 1123–1149. doi: <http://doi.org/10.5194/se-5-1123-2014>
26. Goodarzi, A., Oraee-Mirzamani, N. (2011). Assessment of the Dynamic Loads Effect on Underground Mines Supports. *30th International Conference on Ground Control in Mining*, 74–79.
27. Sokolov, I. V., Antipin, Iu. G., Baranovskii, K. V. (2017). Construction and parameters of the combined system for developing quartz slope deposit. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. *Geo Assets Engineering*, 328 (10), 85–94.
28. Smirnov, S. M., Tatarnikov, B. B., Aleksandrov, A. N. (2014). Influence of the current geodynamic mining situation on stoping-and-backfilling operations. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten*, 11, 45–51.
29. Khani, A., Baghbanan, A., Norouzi, S., Hashemolhosseini, H. (2014). *Effects of fracture geometry and Wittke W. Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM)*. Verlag: Wilhelm Ernst & Sohn, 875.
30. Shabanimashcool, M., Li, C. C. (2015). Analytical approaches for studying the stability of laminated roof strata. *International Journal of Mechanics and Mining Sciences*, 79, 99–108. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.06.007>
31. Wang, D. S., Chang, J. P., Yin, Z. M., Lu, Y. G. (2014). Deformation and failure characteristics of high and steep slope and the impact of underground mining. *Transit Development in Rock Mechanics-Recognition, Thinking and Innovation*, 451–457.
32. Iofis, M. A., Fedorov, E. V., Esina, E. N., Miletenko, N. A. (2017). Advancement of geomechanics toward mineral wealth preservation. *Gornyi Zhurnal*, 11, 18–21. doi: <http://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.03>
33. Khasheva, Z. M., Golik, V. I. (2015). The ways of recovery in economy of the depressed mining enterprises of the Russian Caucasus. *International Business Management*, 9 (6), 1210–1216.
34. Golik, V., Komashchenko, V., Morkun, V., Burdzieva, O. (2015). Metal deposits combined development experience. *Metallurgical and Mining Industry*, 7 (6), 591–594.
35. Karaman, K., Cihangir, F., Kesimal, A. (2015). A comparative assessment of rock mass deformation modulus. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25 (5), 735–740. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.07.006>
36. Rudmin, M. A., Mazurov, A. K., Reva, I. V., Stebletsov, M. D. (2018). Prospects of integrated development of bakchar iron deposit (Western Siberia, Russia) Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. *Geo Assets Engineering*, 329 (10), 85–94.
37. Мухаметшин, В. В., Андреев, В. Е. (2018). Increasing the efficiency of assessing the performance of techniques aimed at expanding the use of resource potential of oilfields with hardztozrecover reserves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 329 (8), 30–36.

38. Kaplunov, D. R., Radchenko, D. N. (2017). Design philosophy and choice of technologies for sustainable development of underground mines. *Gornyi Zhurnal*, 11, 52–59. doi: <http://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.10>

39. 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>

40. 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 the study is the technology and technical means to clear the voids during the underground mining of ores in the disturbed arrays. One of the most problematic places is the repayment of man-made voids that affect the occurrence and redistribution of the stress-strain state (VAT) of the rock mass. Their existence in the earth's crust provokes disturbance of the daily surface, as well as the influence of geomechanical and seismic phenomena, up to the level of earthquakes.

Analytical researches, comparative analysis of theoretical and practical results by standard and new methods with the participation of the authors were performed. The peculiarities of the manifestation of mountain pressure in the rock massifs of a complex structure are considered, due to the intensity of the fracture structures (acoustic stiffness from 0.11 to 0.18 MPa/s, impact coefficient – 0.98). The conditions of manifestation of residual bearing capacity of disturbed rocks and translation of geomaterials into the volume compression mode were investigated (in the zone of disturbed rocks the attenuation coefficient decreases to 0.04–0.15 from the initial value of 0.25–0.35). The basic estimation of durability of workings and inhomogeneous rocks with a strength of 50–150 MPa at depths up to 600 m is shown, depending on the position of workings with respect to the elements of structural disturbance and the possibility of creating reliable structures. Conclusions have been made about the efficiency of the use of load-bearing structures from rocks of greater than 0.2 m in size and mechanical strength of more than 50 MPa, which allows to expose the roof without collapsing at spans of up to 50 m. the bearing layer of the rocks produced space can be extinguished by insulation or a hardener with a strength of up to 1.2 MPa. The results of the research 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:** mountain range, underground development, void repayment, environmental and resource conservation technology, mining efficiency.