

ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Ляшенко В. И., Хоменко О. Е., Чекушина Т. В., Топольный Ф. Ф.

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

В ходе исследования использовались:

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

– лабораторные и производственные эксперименты;

– физическое моделирование и подбор составов твердеющих смесей.

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

Рассмотрены вопросы геодинамического мониторинга НДС массива горных пород для безопасной разработки рудных месторождений скального типа. Показано взаимодействие природных и техногенных факторов для обеспечения геомеханической сбалансированности рудовмещающих массивов и земной поверхности в районе освоения недр в течение длительного периода времени. Обоснованы безопасные геометрические и технологические параметры камерной системы разработки рудных месторождений сложной структуры с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями, включая экологическую безопасность, а также социальный фактор, которые реализованы в инструкциях, стандартах и практике работы рудных шахт Украины. Результаты исследований могут быть использованы при подземной разработке рудных месторождений сложной структуры Украины, Российской Федерации, Республики Казахстан и других развитых горнодобывающих стран мира.

Ключевые слова: *рудные месторождения, подземная разработка, геомеханика горных массивов, буровзрывные работы, технологическая и экологическая безопасность.*

1. Введение

Безопасная разработка месторождений сложной структуры камерными системами с твердеющей закладкой обеспечивается за счет устойчивых параметров камер, определяемых на основании нормативных документов, предусматривающих сплошную отработку рудных залежей [1, 2]. Рудные месторождения государственного предприятия «Восточный горно-обогатительный комбинат» (ГП «ВостГОК», Украина) обладают рядом общих особенностей генезиса, приуроченного к разломам, сложной морфологией рудных залежей и технологическими схемами отработки. Это позволяет сформулировать рекомендации по прогнозу и предотвращению проявления горного давления различных форм при их разработке [3, 4].

Шахты ГП «ВостГОК» при существующей топологии горных выработок, наличием пустот образуют сложную геотехническую систему. Она приводит к опасным динамическим явлениям (интенсивное заколообразование при проходке выработок, уменьшение сечения выработок вплоть до их ликвидации, значительное обрушение, шелушения и стреляния горных пород). Увеличение глубины отработки, объемов пустот отработанных камер на вышележащих горизонтах (превышает 1,5 млн. м³) существенно изменяет геодинамический режим геологической среды [5, 6].

Опыт работы горных предприятий показывает, что проблема борьбы с различными формами динамического проявления горного давления может быть успешно решена при условии упорядочения ведения горных работ. А также соблюдения правил эксплуатации месторождений и выполнения рекомендаций по прогнозу, профилактике и предотвращению горных ударов на стадиях проектирования, строительства и подготовки к их разработке [7, 8].

Поэтому обоснование технологической и экологической безопасности подземной разработки рудных месторождений сложной структуры с учетом геомеханического и сейсмического обоснования оптимальных параметров и схем ведения горных работ – важная научная, практическая и социальная задача, требующая эффективного решения [9, 10]. Этим обеспечивается рациональный способ управления горным давлением путем применения камерных систем разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями различного состава и прочности [11, 12].

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом исследования являются технология и технические средства для подземной добычи руд в энергонарушенных массивах сложной структуры, в которых одним из самых проблемных мест является образование техногенных пустот. Они, в свою очередь, влияют на возникновение и перераспределение напряженно-деформационного состояния (НДС) массива горных пород. При разработке приповерхностных запасов рудных месторождений перераспределение НДС провоцирует эти явления, вплоть до уровня землетрясений.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – обоснование безопасности подземной разработки рудных месторождений сложной структуры геофизическими методами с учетом геомеханического и сейсмического обоснования рациональных параметров и схем ведения горных работ. Благодаря чему достигается устойчивость обнажений горных массивов и сохранность земной поверхности, водных объектов и жилой застройки в зоне влияния горных работ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

1. Выявить возможные технические мероприятия, позволяющие обеспечить устойчивость массива горных пород и сохранение земной поверхности от разрушения.

2. Предложить математические модели по обоснованию безопасных параметров камер, а также твердеющей закладочной смеси и устойчивости обнажений для условий разработки рудных месторождений.

3. Рекомендовать математические модели по обоснованию безопасных параметров камер, обеспечивающие повышение технологической и экологической безопасности окружающей среды в зоне влияния горных работ.

4. Исследование существующих решений проблемы

Исследование безопасности подземной разработки рудных месторождений сложной структуры геофизическими методами с учетом геомеханического и сейсмического обоснования рациональных параметров эксплуатационных блоков выполнялись многими ведущими специалистами развитых горнодобывающих стран мира [13, 14], в частности, в:

- Кривбассе, Украина;
- ОАО «Полтавский ГОК», Украина;
- ЧАО «Запорожский железорудный комбинат (ЧАО «ЗЖРК»)), Украина;
- Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии» (ГП «УкрНИПИИпромтехнологии») и ГП «ВостГОК», г. Желтые Воды, Украина;
- Казенное предприятие «Кировгеология», г. Киев, Украина;
- Национальный технический университет «Днепровская политехника» и Институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), г. Днепр, Украина;
- Государственное высшее учебное заведение «Криворожский национальный университет», г. Кривой Рог, Украина;
- Акционерные общества «ВНИПИпромтехнологии» г. Москва и «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация [15, 16].

Вопросами управления НДС горного массива и сейсмического действия взрыва занимались:

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта» Российской академии наук (ИФЗ РАН), г. Москва, Российская Федерация;

– «Восточный научно-исследовательский горно-металлургический институт цветных металлов» (ОАО «ВНИИЦВЕТ»), г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан;

– ОАО Научно-исследовательский институт по проблемам Курской магнитной аномалии имени Л. Д. Шевякова (ОАО «НИИКМА»), г. Губкин, Российская Федерация и др.

За рубежом эти исследования проводились в США, Германии, Франции, Чили, Австралии и других развитых горнодобывающих странах мира [17, 18].

Оценка устойчивости кровли выработки правильной формы осуществляется по величине эквивалентного пролета постоянной ширины и неограниченной длины этой кровли. Данная оценка получила название метода эквивалентных пролетов и, как показывает практика, дает надежные результаты. Значение эквивалентного пролета определяются по следующим известным методикам:

- методика Протодьяконова М. М. (1933) [1];
- методика Слесарева В. Д. (1948) [2];
- методика Ветрова С. В. (1975) [3];
- методика Борисова А. А. (1980) [4];
- методика Фисенка Г. Л. (1980) [5];
- методика Хомякова В. И. (1984) [6];
- методика Мосинца В. Н. и Слепцова М. Н. (1986) [7] и др.

При этом с увеличением глубины разработки устойчивый эквивалентный пролет уменьшается, что объясняется ростом горного давления, а при уменьшении глубины разработки – увеличивается.

Сохранность поверхностных зданий и сооружений в зоне влияния горных работ в значительной степени зависит от интенсивности и характера прохождения волновых процессов при взрывах в упругих горных массивах, которые формируют закономерности, соответствующие их геомеханическим и геотехническим условиям [19, 20]. Выполнение этих задач возможно при постоянных исследованиях закономерностей распространения сейсмических волн и применения технологических приемов, снижающих объем взрывчатого вещества (ВВ) на одно замедление (внутривеерного замедления, уменьшения высоты подэтажа, встречного взрывания с разделением фронта сейсмической волны, экранированием и др.) [21].

Таким образом, результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что важным для решения вопроса является образование техногенных пустот. Это влияет на возникновение и перераспределение НДС массива горных пород, а также повышение технологической и экологической безопасности окружающей среды в зоне влияния горных работ.

5. Методы исследований

Авторами дан анализ ранее выполненных исследований и контрольных наблюдений, а также даны инструментальные замеры геомеханического состояния горного массива, сейсмического действия взрыва приборами и аппаратурой. Выполнено также математический анализ, статистическая

обработка результатов, установление зависимостей, расчет и обоснование показателей по стандартным и новым методикам.

В ходе исследования применялись следующие термины:

Принципы безопасного ведения горных работ – основные геомеханические правила, регламентирующие порядок выемки рудных тел в напряженном массиве, соблюдение которых исключает возможность создания в нем искусственных концентраторов напряжений в масштабах рудного тела, очистного блока горной выработки. Полное удовлетворение этих принципов позволяет создать безопасные технологические схемы и системы разработки.

Напряженно-деформированное состояние горного массива (НДС) – предмет горной геомеханики.

Горная геомеханика – механика горных пород – наука о прочности, устойчивости и деформируемости массивов горных пород и горнотехнических объектов в условиях горного давления (природного и вызванного горными работами).

Механические свойства горных пород – характеризуют изменения формы, размеров и сплошности горных пород под воздействием механических нагрузок, которые создаются в результате действия естественных (горное давление, тектонические движения) или искусственных факторов (взрывные работы). Механические нагружения вызывают в горных породах напряжения и деформации. По виду деформаций и связи с вызвавшими их напряжениями механические свойства подразделяются на следующие свойства:

- упругие (модуль Юнга, модуль объемного сжатия и др.);
- пластические (коэффициент Пуассона, модуль полной деформации, коэффициент пластичности и др.);
- прочностные (пределы прочности горных пород при сжатии и растяжении и др.);
- реологические (период релаксации, предел длительной прочности и др.).

5.1. Геофизические методы исследований

При разработке сложно-структурных рудных месторождений они используются на горно-добывающих предприятиях для диагностики, связанной с определением зон повышенной концентрации или неоднородностей горного массива. Для упруго-пластических свойств горных пород, контроля НДС горного массива в процессе ведения и развития горных работ (геомеханический и как составная часть, сейсмический мониторинг). Для обеспечения устойчивости горных выработок и предотвращения динамического проявления горного давления, прогноза различных участков массива горных пород и руд по степени удароопасности и профилактики динамического проявления горного давления [22, 23]. Геомеханический мониторинг горного массива и целиков различного назначения осуществляется посредством звукометрических и маркшейдерских приборов, струнных тензометров, глубинных и грунтовых реперов. А также оптических приборов, электрических цепей, визуально и косвенных методов по изменению минерализации шахтных вод и другого методического и приборного геомеханического обеспечения. Для расширения применения геофизических методов на горнодобывающих предприятиях необходимо создание малогабаритных помехоустойчивых средств регистрации

параметров измерений, методологии, интерпретации результатов натуральных наблюдений, поверки и стандартизации аппаратуры. Наиболее освоены в подземных условиях на горнодобывающих предприятиях следующие геофизические методы:

- акустический (метод акустической эмиссии), основанный на регистрации акустических сигналов в массиве горных пород при различных нагрузках в диапазоне частот 10–100 кГц;

- сейсмоакустический, регистрирующий сейсмоакустические процессы в диапазоне частот 100–1000 Гц;

- сейсмические, регистрирующие сейсмические волны, возбуждаемые в массиве горных пород, в диапазоне 30–5000 Гц;

- электрометрический, основанный на зависимости электрического сопротивления горных пород от их напряженного состояния.

Применение геофизических методов в таком диапазоне частот позволяет оперативно получать достаточно полную информацию о состоянии массива горных пород как на малых базах в горных выработках, так и на значительных площадях, в пределах шахтных полей. Комплексное использование геофизических методов дает возможность проводить оценку напряженного состояния горных пород и изменения их упругих и прочностных свойств.

Внедрение геофизических методов существенно повышает оперативность и технологичность прогноза горных ударов, особенно прогноза степени удароопасности отдельных участков рудных залежей. Ведется дальнейшее развитие и совершенствование сейсмических методов прогноза горных ударов в направлении создания экспресс-методов для геоинформационного обеспечения горных работ. В каждом конкретном случае применяется один или комплекс методов в зависимости от целей и задач исследований, наличия аппаратуры и подготовленных специалистов. Из перечисленных сейсмических методов определения напряженного состояния горного массива широкое распространение получил метод акустической эмиссии [24, 25].

5.2. Звукометрические приборы

Для оперативного контроля, прогноза состояния горного массива применяются звукометрические переносные и стационарные приборы, как наиболее точные и простые средства и методы наблюдений (табл. 1). В основу приборов, улавливающих звуковые импульсы разрушения (горные шумы), возникающие в момент нарушения целостностей внутренних связей отдельностей массива пород и руд, положен метод пьезоэлектрического эффекта. Переносные звукометрические приборы (датчики и индикаторы звуков разрушения и звукометрические станции) предназначены для проведения контрольно-профилактических и регулярных наблюдений в местах, где отсутствуют наблюдательные станции [26, 27].

При оценке степени устойчивости подработанного массива важнейшей характеристикой является зависимость его звукоактивности от величины напряжений и деформаций, полученная при различных степенях нагружения образцов пород и руд в лабораторных или в натуральных условиях. Многочисленные

опыты и эксперименты показывают, что при напряжениях 60–80 % от разрушающих значений звукоактивность массива горных пород резко увеличивается.

Таблица 1

Звукометрические приборы и системы

Наименование приборов и систем	Модель	Частотный диапазон, Гц	Разработчик
Индикатор звукового разрушения	ЗИР-3	$0-5 \cdot 10^3$	ГП «НИГРИ», г. Кривой Рог, Украина
Звукометрический прибор	ЗП-5, ЗП-6	$20-2 \cdot 10^4$	ОАО «ВНИПИпром технологии», г. Москва, Россия
Двухканальный регистратор	РЭМ-1	$50-4 \cdot 10^4$	ГП «УкрНИПИИ промтехнологии», г. Желтые Воды, Украина
Двухканальный цифровой измеритель	АЭР-2Ш	$4-40 \cdot 10^3$	ИФ и МГП АН, г. Бишкек, Республика Киргизстан
Стационарная сейсмоакустическая аппаратура	Гроза-16	$20-4 \cdot 10^4$	НПО «Сибцвет автоматика», г. Красноярск, Россия

Организация мониторинга с целью обеспечения безопасной технологии добычи руд должна быть подчинена решению следующих основных задач:

- определение условий обеспечения необходимой устойчивости элементов горного массива, подготовительных и очистных выработок, подземных и наземных сооружений и других объектов;
- эффективной организации горных работ, прогнозирования и своевременного применения мер предотвращения динамических проявлений горного давления;
- установлению закономерностей и параметров рационального взаимодействия элементов горного массива между собой, а также с закладкой техногенного пространства и элементами инженерных сооружений при ведении горных работ.

6. Результаты исследования

6.1. Краткая характеристика рудных месторождений сложной структуры

Приповерхностные запасы Мичуринского месторождения ГП «ВостГОК» (Украина), значительная часть которого залегает под рекой Ингул, промышленными и гражданскими зданиями и сооружениями, представлено крутопадающими рудными телами различной мощности. Длина рудных тел составляет по простиранию от 600 до 700 м (преимущественно 100–250 м), по падению от 150 до 400 м. Руды и вмещающие их породы крепкие: коэффициент крепости по шкале проф. Протодяконова М. М. $f=14-18$, массивные и имеют неслоистое строение. В направлении к поверхности происходит существенное ухудшение количественных и качественных характеристик трещиноватости как по отдельным залежам, так и по месторождению в целом. На верхних горизонтах породы выветренные: коэффициент f снижается до 6. Месторождение разрабатывается камерной системой разработки с закладкой выработанного пространства твердеющей смесью (рис. 1).

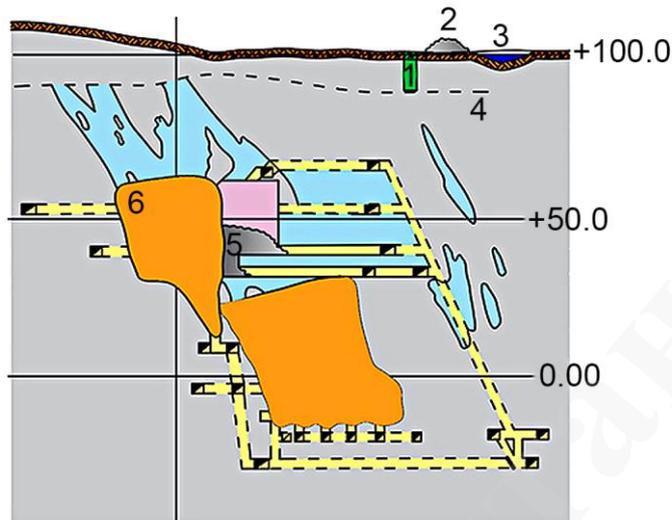


Рис. 1. Камерная система разработки с торцовым выпуском руды:
 1 – противофильтрационная завеса; 2 – дамба; 3 – река Ингул; 4 – нижняя граница коры выветривания; 5 – отбитая руда; 6 – камеры отработанные и погашенные твердеющей закладкой

Горные работы развиваются на глубине от 40–50 м до 350 м. Камеры отработывают подэтажами высотой 10–15 м. Отбойка руды производится скважинными зарядами диаметрам 57 и 65 мм, разбуренные станками НТ–2 и ПК–75 (Украина). Параллельные нисходящие скважины диаметром 85 и 105 мм для образования отрезных щелей бурят станками НКР–100 М (Украина).

6.2. Оценка геомеханического состояния горного массива

Горные работы на рудных месторождениях ГП «ВостГОК» ведутся с 1968 г. на Ингульской шахте, которой отработываются два месторождения:

1) Мичуринское – в этажах 210–150 м, 280–210 м, начата отработка в этаже 280–350 м);

2) Центральное (Восточная зона) – в этажах 230–160 м, 300–230 м.

Смолинской шахтой эксплуатируется Ватутинское месторождение с 1972 г., где к настоящему времени основная часть запасов отработана, горно-подготовительные работы ведутся в этажах 550–640 м, очистная выемка в этажах 460–550 м. Новоконстантиновской шахтой эксплуатируется Новоконстантиновское месторождение с 2010 г.

В проектах отработки Мичуринского, Центрального, Ватутинского и Новоконстантиновского месторождений решены основные вопросы вскрытия, способа и порядка отработки месторождений. Остаточные запасы, представленные отдельными рудными телами, подлежат отработке после выемки основных запасов. Вскрытие залежей на горизонтах осуществляется квершлагами и полевыми штреками в висячих и лежащих боках, сбитых между собой ортами заездами. Подэтажи вскрываются полевым штреком в висячем боку и буровыми выработками по руде.

Основные системы разработки – подэтажные штреки и орты с погашением пустот отработанных камер твердеющей закладкой. Для чего, каждая залежь разбивается на очистные блоки, которые обрабатываются серией первичных и вторичных камер. В блоках первой очереди выемка запасов осуществляется, как правило, от середины, во вторичных блоках – от флангов.

Для месторождений Ингульской, Смоленской и Новоконстантиновской шахт характерно наличие внутри залежей многочисленных включений пустых пород и некондиционных руд, прослоек. Залежи часто прерываются, выклиниваются и появляются вновь, распадаясь на отдельные тела, имеющую сложную морфологию. Отработка таких залежей сопряжена с необходимостью иметь развитую сеть горных выработок, что значительно влияет на геомеханическое состояние горного массива. К окончанию отработки горизонта горный массив, где велись очистные и закладочные работы, имеет сложную геомеханическую структуру.

Для оперативного контроля, прогноза НДС горного массива применялись звукометрические приборы, в частности, переносные как наиболее простые средства и методы наблюдений, (разработанные НПК «А и М», изготовленные совместно с ремонтно-механическим заводом (РМЗ) ГП «ВостГОК», Украина) и др. (рис. 2).

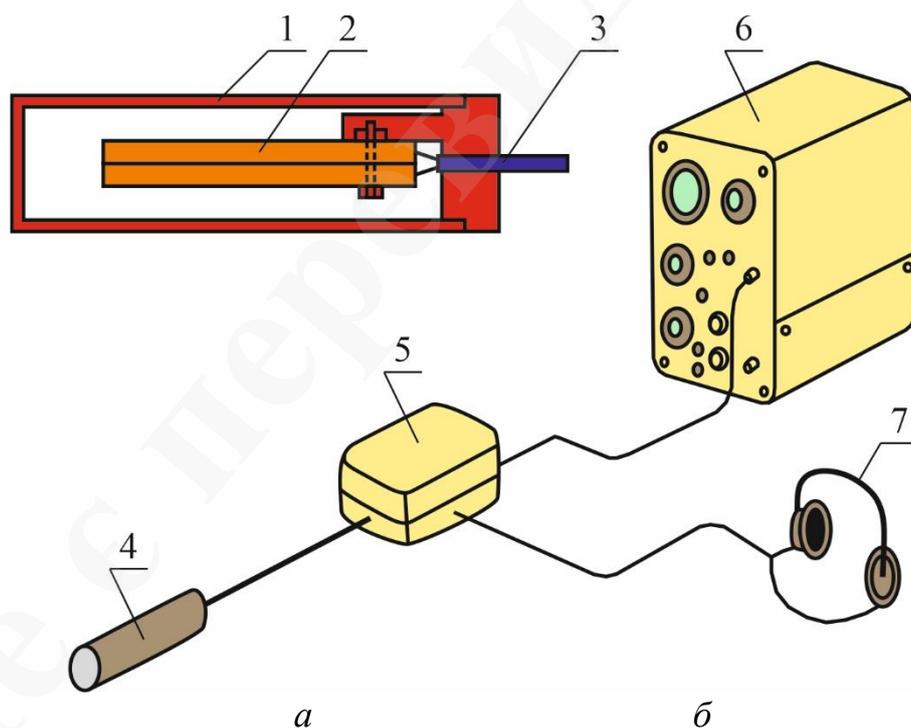


Рис. 2. Схема звукометрического метода зондирования массива горных пород:
а – конструкция датчика; *б* – рабочая схема: 1 – корпус датчика;
2 – кристалл сегнетовой соли; 3 – кабель; 4 – датчик; 5 – усилитель;
6 – осциллограф; 7 – наушники

В основу приборов, улавливающих звуковыми импульсами разрушения (горные шумы), возникающие в момент нарушения целостностей внутренних связей отдельностей массива пород и руд, положен метод пьезоэлектрического эффекта. Коэффициент усиления таких приборов не превышает 10^5 , а общая масса комплекта –

не более 10 кг. Для звукометрических приборов основным элементом в комплекте аппаратуры является пьезоэлектрический геофон (датчик-приемник звуков разрушения). Он представляет собой изолированную гильзу из нержавеющей трубки диаметром 38–42 мм и длиной 150–220 мм, внутри которого в специальном держателе консольно закреплен пьезоэлемент размерами 65x20x3,5 мм или 65x20x2,5 мм. Проходящие по массиву горных пород звуки разрушения вызывают механические колебания пьезоэлемента, вследствие этого на противоположных гранях возникает разность электрических потенциалов, которая и регистрируется.

Проходящие по массиву горных пород звуки разрушения вызывают механические колебания пьезоэлемента. Вследствие этого на противоположных гранях возникает разность электрических потенциалов, которая и регистрируется. На основе результатов натуральных испытаний элементов горного массива, проведенных на Мичуринском месторождении ГП «ВостГОК» (Украина) при отработке приповерхностных запасов, построены зависимости частоты звуков разрушения от величины напряжений σ (рис. 3), согласно формуле [28, 29]:

$$\sigma = a \cdot N_{II}^b, \quad (1)$$

где N_{II} – количество импульсов в минуту; a и b – соответственно коэффициенты, характеризующие структурные и прочностные свойства горного массива.

Дистанционные системы звукометрического контроля за камерами и массивом в целом показали, что перераспределение напряжений в массиве происходит в течении 15 минут после массового взрыва и в дальнейшем не превышает 0–10 имп./мин. Звукометрические наблюдения в 14 из 23 камер блоков, подтвердили устойчивое состояние массива (интенсивность импульсов 0–17 имп./мин.). Установлено, что при устойчивых обнажениях камер в течении 2–2,5 лет, их дальнейшее состояние остается стабильным. Эти камеры возможно исключить из перечня подлежащих звукометрическому контролю. Инструментальными измерениями звукометрическими приборами установлено также состояние устойчивости горных массивов при интенсивности импульсов 0–3 имп./мин. Это подтверждается визуальным осмотром обнажений камер 10-ти эксплуатационных блоков в этажах 280–520 м Смолинской шахты ГП «ВостГОК» (Украина). Обследованные камеры и горный массив в целом находятся в устойчивом состоянии, опасности обрушения горных пород нет [30, 31].

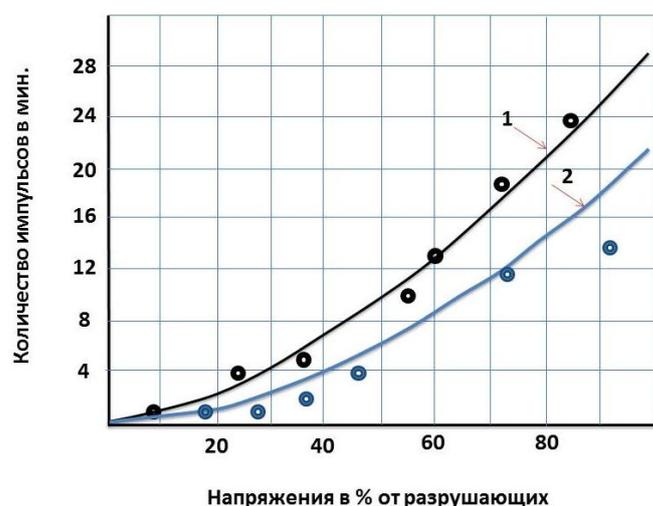


Рис. 3. Зависимость частоты звуков разрушения от величины напряжения для различных типов пород:
1, 2 – соответственно, средне и сильно трещиноватый массив

Прогнозная классификация горных массивов по трещиноватости и их основным горнотехнологическим показателям устойчивости и дробимости представлены в табл. 2.

Таблица 2

Прогнозная классификация горных массивов

Характеристика трещиноватости массивов пород	Выход керна, %	Коэффициенты структурного ослабления	Показатели трещиноватости и блочности			Переходные коэффициенты	
			удельная трещиноватость, число трещин/м ²	расстояние между трещинами (ребро приведенного куба), см	доля кусков с диагональю более 700 мм, %	устойчивости	дробимости
Слаботрещиноватые	>80	0,4–0,5	0–8	>35	70	1,5–1,7	1,1–1,4
Среднетрещиноватые	45–80	0,2–0,4	8–15	15–35	20–70	1,0	1,0
Сильнотрещиноватые	30–45	0,1–0,2	15–30	5–15	1–20	0,5–0,6	0,6–0,9
Раздробленные	<30	<0,1	>30	<5	0	<0,5	0,4–0,5

6.3. Исходные данные по твердеющей закладке

Устойчивость горизонтальных и вертикальных обнажений закладки находится в прямой зависимости от качества закладочной смеси, времени твердения и монолитности (рис. 4).

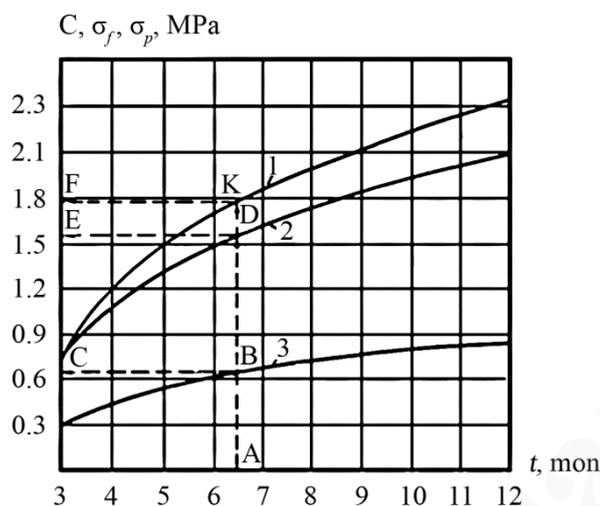


Рис. 4. Прочностные характеристики закладки в зависимости от периода твердения (t): 1, 2, 3 – соответственно, коэффициент сцепления (C), предел прочности на изгиб (σ_f) и растяжение (σ_p), МПа; ключ: А–В–С; А–D–E; А–K–F

6.4. Определение основных параметров камер

Геометрические параметры камер должны обеспечивать устойчивость обнажений массива без значительных обрушений (не более 300 м^3), препятствующих отработке запасов эксплуатационного блока. Методы определения геометрических параметров камер авторы разделяет на две группы: 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 [25, 26]. Эмпирический метод основан на применении графического анализа данных с использованием закономерностей и функциональных зависимостей. Примерами служат метод функциональных характеристик, для разработки инструкций по определению геометрических параметров этажно-камерных систем разработки в Кривбассе (Украина). Метод АО «ВНИМИ» (Российская Федерация) – по установлению размеров камер и целиков при камерных системах разработки руд черных и цветных металлов [27, 28]. На основании результатов многолетних исследований проведения комплекса научно-исследовательских работ при подземной разработке месторождений сложной структуры в энергонарушенных массивах авторы предлагают математические модели по обоснованию безопасных параметров камер (табл. 3).

Расчеты параметров выполнены исходя из следующих условий: руда и вмещающие породы устойчивые средней трещиноватости, крепость по шкале проф. Протодяконова 12–18, угол падения залежей больше 50° . При мощности рудных тел 3–15 м применяется система разработки подэтажными штреками и больше 15 м – подэтажными ортами. 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. Технологические параметры системы разработки приведены в табл. 4 [32, 33].

Таблица 3

Безопасные параметры камер для месторождений сложной структуры

Наименование параметров	Расчетные формулы
<p>Эквивалентные пролеты при обнажениях, м ($L_{\text{ЭКВ}}$):</p> <p>правильной формы</p> <p>неправильной формы</p>	$L_{\text{ЭКВ}} = \frac{a \cdot B}{\sqrt{a^2 + B^2}}$ $L_{\text{ЭКВ}} = \frac{2,5 \cdot S}{P_0}$
Критерий устойчивости обнажений, м ($L_{\text{ЭДОП}}$):	$L_{\text{ЭКВ}} = L_{\text{ЭДОП}} = \frac{L_{\text{ЭО}}}{1,1}$
<p>Устойчивые пролеты, м:</p> <p>горизонтальный ($L_{\text{Г.ЭКВ}}$)</p> <p>вертикальный ($L_{\text{В.ЭКВ}}$)</p>	$L_{\text{Г.ЭКВ}} = \frac{a \cdot B}{\sqrt{a^2 + B^2}}$ $L_{\text{В.ЭКВ}} = \frac{a \cdot H}{\sqrt{a^2 + H^2}}$
Эквивалентный пролет ($L_{\text{ЭО}}$, м) с учетом времени существования обнажений (t , мес.)	$L_{\text{ЭО}}^2 \cdot t = \text{const} = A$
<p>Эквивалентные пролеты для закладки, м:</p> <p>горизонтальный</p> <p>вертикальный</p>	$L_{\text{Г.ЭКВ}} = \sqrt{\frac{2\sigma_{\text{из}} \cdot h_{\text{сл}}}{\gamma_3 \cdot K_3}}$ $L_{\text{В.ЭКВ}} = \frac{2C_M}{\gamma_3 \cdot K_3} \text{ctg}(45^\circ + \frac{\rho}{2})$
<p>Устойчивость обнажений, м:</p> <p>длина (a)</p> <p>ширина (b)</p> <p>высота (H)</p>	$a = \frac{L_{\text{Г.ЭКВ}} \cdot b}{\sqrt{b^2 + L_{\text{Г.ЭКВ}}^2}}$ $b = \frac{L_{\text{Г.ЭКВ}}^2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + L_{\text{Г.ЭКВ}}^2}}$ $H = \frac{L_{\text{В.ЭКВ}} \cdot a}{\sqrt{a^2 + L_{\text{В.ЭКВ}}^2}}$

Таблица 4

Технологические параметры системы разработки

Параметры	Значение показателей при мощности рудных тел, м		
	от 3 до 6	от 6 до 15	от 15 до 90
Размеры камер, м:			
высота	60–70	60–70	60–70
длина	40–70	30–60	15–90
ширина	3–6	6–15	12–15
высота, м:			
подэтажа	10–13	16–20	16–20
днища	8–13	11	11
Расстояние между выпускными выработками, м	8	8–10	8–10
Объем горных работ: в пределах границ блока 1000 т балансовых запасов, м ³ ; на 1 м мощности залежи, м ³	140–70 23,0	70–28 4,7	80–42 4,8
Порядок отработки запасов блоков	Через камеру		Через две камеры – запасы первых очередей выемки, вторых – через три
Направление отбойки запасов камер	От центра к флангу или от фланга к флангу		От висячего бока к лежащему, или наоборот
Порядок отбойки запасов на подэтаже	Почвоуступный		Почвоуступный
Образование отрезной щели	Снизу вверх		Снизу вверх
Расположение буровых скважин	Веерное		Веерное
Диаметр скважин, мм			
при отбойке запасов камер	65	65	65
при образовании отрезной щели	85	85	85
Способ выпуска руды	С горизонтом доставки	Самотечный	
Выход негабарита, %	4–5	5–7	
Прочность твердеющих закладочных смесей, МПа:			
для днищ (потолочин) и камер первой очереди отработки	2,5	3,0	6,0
для камер других очередей отработки	1,2	1,5	2,0

Таким образом, формы динамического проявления горного давления обусловлены рядом факторов, наиболее существенными из которых являются: природные, развитая сеть тектонических нарушений вблизи Главного разлома. Также горнотехнические, зависящие от способов ведения горных работ, изрезанности массива выработками, ведения работ одновременно несколькими забоями, выемки напряженных целиков, ведения горных работ под целиками. Техногенные, связанные с последствиями производства горных работ и сейсмическим действием взрывов, созданием практически мгновенно больших обнажений при очистной выемке рудных тел [34, 35]. На основании анализа геомеханической ситуации отработки месторождений представлены условия,

способствующие или снижающие динамические проявления горного давления при отработке рудных залежей (табл. 5).

Таблица 5

Характеристика условий динамического проявления горного давления

Характеристика условий	
Способствующие	Снижающие
<ul style="list-style-type: none"> – остаточные тектонические напряжения; – наличие разрывных структур: разломов, даек, многочисленных пережимов и апофизов; – перемежаемость руд и пород, литологических разновидностей, внутри породные включения в рудных телах; – повышенная водообильность, приуроченная к зонам дробленных и сильнотрещиноватых пород; – возможность образования очагов перенапряженных массивов горных пород в результате 	<ul style="list-style-type: none"> – сплошная система отработки с закладкой выработанного пространства; – наличие вертикальных разгрузочных слоев (отрезных щелей) при камерных системах разработки
<ul style="list-style-type: none"> – действия геодинамических факторов и сейсмозрывных сотрясений; – увеличение глубины отработки; – отработка рудных залежей от фланга к флангу 	<ul style="list-style-type: none"> – незначительное наличие зон (1–2 %) дробленных (неустойчивых) пород; – незначительная обводненность рудных залежей
<ul style="list-style-type: none"> – уступная форма забоя при ведении очистных работ; – образование больших площадей обнажений в конечной стадии отбойки уступов из подэтажных штреков (ортов); – наличие значительного объема незаложенных пустот 	<ul style="list-style-type: none"> – песчано-шлаковые (бесцементные) составы закладочных смесей

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

- созданию соответствующей подсистемы автоматизации проектирования и планирования горных работ;
- повышению технологической и экологической безопасности окружающей среды;
- рациональному использованию и охране недр;
- безопасности жизнедеятельности человека в зоне влияния горных работ [36, 37].

6.5. Результаты внедрения

В результате проведения комплекса научно-исследовательских работ авторами установлен современный технический уровень применяемой системы разработки, а также составлена Инструкция по обоснованию безопасного ведения горных работ и порядка отработки рудных залежей на шахтах ГП «ВостГЭК». В ней изложены основные положения, геомеханическая характеристика рудных месторождений и определены критерии оценки НДС горного массива. Описаны условия безопасного ведения горных работ, порядок определения размеров опасных зон и хрупкого разрушения горных пород, склонных к динамическому проявлению горного давления различных форм. Приведено обоснование безопасного порядка отработки рудных залежей в пределах шахтного поля. Показана безопасность ведения горных работ в

сближенных рудных телах и рудных залежах, а также безопасность отработки горных массивов при динамическом действии взрыва. Даны мероприятия по безопасному ведению горных работ и снижению динамического проявления горного давления различных форм, включая сейсмотехнические массы зарядов ВВ. Показано 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 ГП «ВостГОК». Настоящая *Инструкция* утверждена и успешно используется специалистами технологических и геолого-маркшейдерских служб.

6.6. Перспективы развития исследований

В условиях рыночной экономики, когда горные предприятия в погоне за прибылью прибегают к нерегулируемой выборочной разработке месторождения, что сопровождается отрицательными экономическими последствиями (ущербом) [38, 39], становится важным вопрос внедрения инновационных технологий горнометаллургического комплекса на базе математического моделирования технологических процессов и геоинформационных систем (ГИС). ГИС – информационная система, обеспечивающая сбор, хранение, обработку, отображение, анализ, моделирование и распространение пространственно-координированных данных [40, 41].

Несмотря на многообразие применяемых методов и средств диагностики и контроля НДС массива горных пород, их можно по функциональному назначению объединить в три класса: аналитические методы, методы натурных наблюдений, методы моделирования. Натурные наблюдения включают визуальные, маркшейдерские измерения, механические, геофизические, химико-физические и комбинированные методы. Это дает возможность прогнозировать устойчивость массива, конструктивные элементы систем разработки и безопасные условия ведения работ под водными объектами и в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях месторождений полезных ископаемых.

Успешное решение поставленных задач связано не только с проведением исследований, но и пересмотром системы организации и планирования горных работ на подземных рудниках. Поскольку назрела необходимость создания геотехнических систем контроля и служб прогноза и профилактики динамических проявлений горного давления, влияющих на сохранность горных выработок и устойчивость обнажений камер.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. На основании анализа геомеханической ситуации отработки рудных месторождений сложной структуры предложены условия, способствующие или снижающие динамические проявления горного давления при отработке рудных залежей. А также составлена и утверждена «Инструкция по обоснованию безопасного ведения горных работ и порядка отработки рудных залежей на шахтах ГП «ВостГОК».

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

- созданию соответствующей подсистемы автоматизации проектирования и планирования горных работ;

- повышению технологической и экологической безопасности окружающей среды;

- рациональному использованию и охране недр;

- безопасности жизнедеятельности человека в зоне влияния горных работ.

Результаты исследований могут быть использованы при подземной разработке рудных месторождений сложной структуры Украины, Российской Федерации, Республики Казахстан и других развитых горнодобывающих стран мира.

Threats. 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.

8. Выводы

1. Обосновано, что геометрические параметры камер, устойчивость вертикальных и горизонтальных обнажений находятся в зависимости от интенсивности отработки и закладки камер. Чем быстрее отрабатывается и закладывается камера, тем больше допускается обнажение.

2. Предложена функциональная взаимосвязь между величиной напряжений горного массива и количеством импульсов (звуков разрушения) в минуту, характеризующих его структурные (*a*) и прочностные (*b*) свойства, описывается

криволинейной зависимостью вида $y=axb$. Данная взаимосвязь позволяет с вероятностью 0,8 оперативно устанавливать устойчивые параметры обнажений.

3. Рекомендованы математические модели по обоснованию безопасных параметров камер, обеспечивающие повышение технологической и экологической безопасности окружающей среды, рациональное использование и охрану недр, а также безопасности жизнедеятельности человека в зоне влияния горных работ.

Благодарность

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

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

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

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

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

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

Литература

1. Protodiakonov, M. M. (1933). *Davlenie gornykh porod i rudnichnoe kreplenie. Ch. 1: Davlenie gornykh porod*. Moscow: izd. GNTGI, 128.

2. Slesarev, V. D. (1948). *Opreделение optimalnykh razmerov tselikov razlichnogo naznacheniiia*. Moscow: Ugletekhizdat, 57.

3. Vetrov, S. V. (1975). *Dopustimye razmery obnazhenii gornykh porod pri podzemnoi razrabotke rud*. Moscow: Nauka, 223.

4. Borisov, A. A. (1980). *Mekhanika gornykh porod*. Moscow: Nedra, 359.

5. Fisenko, G. L. (1980). *Predelnoe sostoianie gornykh porod vokrug vyrabotok*. Moscow: Nedra, 359.

6. Khomiakov, V. I. (1984). *Zarubezhnii opyt zakladki na rudnikakh*. Moscow: Nedra, 224.

7. Sleptsov, M. N., Azimov, R. Sh., Mosinets, V. N. (1986). *Podzemnaia razrabotka mestorozhdenii tsvetnykh i redkikh metallov*. Moscow: Nedra, 206.

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

9. Golik, V. I., Komashenko, V. I., Liashenko, V. I. (2020). Monitoring tekhnogenogo seismicheskogo vozdeistviia pri dobyche rud. *Geofizika, 1*, 42–48.

10. 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://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.195946>

11. Lyashenko, V., Khomenko, O., Golik, V., Topolnij, F., Helevera, O. (2020). Substantiation of environmental and resource-saving technologies for void filling under

underground ore mining. *Technology Audit and Production Reserves*, 2 (3 (52)), 9–16. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.200022>

12. Lyashenko, V. I., Golik, V. I. (2006). Prirodookhrannye tekhnologii podzemnoi razrabotki uranovykh mestorozhdenii. *Gornii zhurnal*, 2, 89–92.

13. Bariakh, A. A. (2010). Geomekhanika: sintez teorii i eksperimenta. Strategii i protsessy osvoeniia georesursov. *Materialy sessii Gornogo instituta UrO RAN*. Perm: Gornii in-t Ur O RAN, 78–79.

14. Kuzmin, Iu. O., Zhukov, V. C. (2012). *Sovremennaia geodinamika i variatsii fizicheskikh svoistv gornykh porod*. Moscow: Gornaia kniga, 264.

15. Bondarenko, V., Kovalevs'Ka, I., Svystun, R., Cherednichenko, Y. (2013). Optimal parameters of wall bolts computation in the united bearing system of extraction workings frame-bolt support. *Mining of Mineral Deposits*, 5–10. doi: <http://doi.org/10.1201/b16354-2>

16. Lyashenko, V. I., Skipochka, S. I., Ialanskii, A. A., Palamarchuk, T. A. (2012). Geomekhanicheskii monitoring pri podzemnoi razrabotke mestorozhdenii slozhnoi struktury. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornii zhurnal*, 4, 109–118.

17. Trubetskoi, K. N., Zakharov, V. N., Viktorov, S. D., Zharikov, I. F., Zakalinskii, V. M. (2014). Vzryvnoe razrushenie gornykh porod pri osvoenii nedr. *Problemy nedropolzovaniia*, 3, 80–95.

18. Golik, V., Komashchenko, V., Morkun, V. (2015). Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use. *Metallurgical and Mining Industry*, 3, 49–52.

19. Chystiakov, E. P. (2006). Sovershenstvovanye sposobov podderzhaniia podzemnykh hornikh virabotok shakht Kryvorozhskoho basseina. *Visnyk Kryvorizkoho tekhnichnoho universytetu*, 13, 16–20.

20. Eremenko, V. A., Esina, E. N., Semeniakin, E. N. (2015). Tekhnologiiia operativnogo monitoringa napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia razrabatyvaemogo massiva gornykh porod. *Gornii zhurnal*, 8, 42–47.

21. Dmitrak, Iu. V., Kamnev, E. N. (2016). AO «Veduschii proektno-izyskatelskii i nauchno-issledovatel'skii institut promyshlennoi tekhnologii» – Put dlinoi v 65 let. *Gornii zhurnal*, 3, 6–12.

22. Stupnik, M., Kalinichenko, O., Kalinichenko, V., Pysmennyi, S., Morhun, O. (2018). Choice and substantiation of stable crown shapes in deep-level iron ore mining. *Mining of Mineral Deposits*, 12 (4), 56–62. doi: <http://doi.org/10.15407/mining12.04.056>

23. Krupnik, L., Shaposhnik, Y., Shaposhnik, S., Konurin, A., Shokarev, D. (2018). Selection of accessing and development schemes for extracting reserves of ore body 2 in Irtysh deposit. *Mining of Mineral Deposits*, 12 (4), 108–114. doi: <http://doi.org/10.15407/mining12.04.108>

24. Kulikovska, O., Sydorenko, V. (2017). Research into the influence of technical factors on rocks deformation during reworking of ore deposits. *Mining of Mineral Deposits*, 11 (3), 76–83. doi: <http://doi.org/10.15407/mining11.03.076>

25. Petlovanyi, M., Lozynskiy, V., Zubko, S., Saik, P., Sai, K. (2019). The influence of geology and ore deposit occurrence conditions on dilution indicators of extracted reserves. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 34 (1), 83–91. doi: <http://doi.org/10.17794/rgn.2019.1.8>

26. Petlovanyi, M., Kuzmenko, O., Lozynskiy, V., Popovych, V., Sai, K. (2019). Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in

mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 13 (1), 24–38. doi: <http://doi.org/10.33271/mining13.01.024>

27. Blyuss, B., Semenenko, Y., Medvedieva, O., Kyrychko, S., Karatayev, A. (2020). Parameters determination of hydromechanization technologies for the dumps development as technogenic deposits. *Mining of Mineral Deposits*, 14 (1), 51–61. doi: <http://doi.org/10.33271/mining14.01.051>

28. Lyashenko, V., Vorob'ev, A., Nebohin, V., Vorob'ev, K. (2018). Improving the efficiency of blasting operations in mines with the help of emulsion explosives. *Mining of Mineral Deposits*, 12 (1), 95–102. doi: <http://doi.org/10.15407/mining12.01.095>

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

30. Viktorov, S. D., Goncharov, S. A., Iofis, M. A., Zakalinskii, V. M. (2019). *Mekhanika sdvizheniia i razrusheniia gornykh porod*. Moscow: RAN, 360.

31. Eremenko, V. A., Aibinder, I. I., Patskevich, P. G., Babkin, E. A. (2017). Otsenka sostoianiia massiva gornykh porod na rudnikakh ZF OAO «GMK «Norilskii Nikel». *Gornii informatsionno-analiticheskii biulleten*, 1, 5–17.

32. Golik, V. I., Komashenko, V. I. (2017). Otkhody obogascheniia zhelezistykh kvartsitov kak syre dlia doizvlecheniia metallov i ispolzovaniia v kachestve zakladochnykh smesei. *Gornii zhurnal*, 3, 43–47.

33. Golik, V. I., Razorenov, Iu. I., Karginov, K. G. (2017). Osnova ustoichivogo razvitiia RSO – Alaniia – gornodobyvaiuschaia otrasl. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii*, 9 (2 (32)), 163–171.

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

35. Sergei D., V., Vladimir M., Z., Ivan E., S., Rafael Ia., M. (2020). New aspect of drilling development and application in today's mineral extraction. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*, 6, 5–13. doi: <http://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-6-5-13>

36. Andrei, Z. (2020). The criterion of block media strength and geomechanical back-calculation. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Gornyi Zhurnal*, 6, 37–47. doi: <http://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-6-37-47>

37. Khomenko, O. E., Lyashenko, V. I. (2020). Novye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva krepleniia gornykh vyrabotok s ispolzovaniem geoenergii. *Marksheiderskii vestnik*, 4 (137), 54–61.

38. Izbachkov, Iu. S., Petrov, V. N. (2006). *Informatsionnye sistemy*. Saint Petersburg: Izd-vo Piter, 656.

39. Serii, S. S., Gerasimov, A. V., Shaitan, O. B. et. al. (2007). Avtomatizirovannaia sistema informatsionnogo obespecheniia gornogo proizvodstva. *Gornii zhurnal*, 9, 81–85.

40. Babina, T. O., Zhidkov, S. N., Kushnarev, P. I., Markova, N. S. (2007). Ob ispolzovanii kompiuternogo modelirovaniia pri podschete zapasov. *Nedropolzovanie. XXI vek*, 6, 30–33.

41. Bekmukhanova, R. Sh., Salanin, A. V., Riazantsev, R. G. (2008). Vnedrenie geoinformatsionnoi sistemy GEOMIKS na shakhte «Molodezhnaia». *Gornii zhurnal*, 5, 20–22.