ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-2-104-118

Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах

Ляшенко В. И.[1], Хоменко О. Е.[2], Голик В. И.[3]

[1]Государственное предприятие Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии (ГП «УкрНИПИИпромтехнологии»), г. Желтые Воды, Украина;
[2]Национальный технический университет «Днепровская политехника», г. Днепр, Украина;
[3]Северо-Кавказский горно-металлургический институт (СКГТУ), г. Владикавказ, Россия

Аннотация: Одним из самых проблемных мест при подземной добыче руд в энергонарушенных массивах 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 способствует возникновению геомеханических и сейсмических явлений. Цель исследования – обоснование природоохранных и ресурсосберегающих технологий погашения пустот при подземной добыче руд на основе установления закономерностей проявления горного давления массива горных пород, что позволит обеспечить сохранность дневной поверхности и жизнедеятельность населения, проживающего в зоне влияния горнодобывающего региона. Основными отрицательными последствиями воздействия 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 экономического оборота и др. На основе исследования механизма НДС массива пород с использованием геофизических и маркшейдерских методов предложена природоохранная технология погашения техногенных пустот в энергонарушенных массивах. Она позволяет обеспечить сохранность дневной поверхности и жизнедеятельность населения, проживающего в зоне влияния горных объектов (шахты, отвалы, промышленные площадки для закладочных комплексов, предконцентрации и кучного выщелачивания металлов из некондиционного рудного сырья, хвостохранилищ и др.). Предложены комбинированные геотехнологии погашение пустот при разработке рудных месторождений подземным блочным выщелачиванием и осуществлено научно–методическое сопровождение и техническое обеспечение буровзрывной подготовки скальных руд и отработки ПБВ опытно–экспериментальных блоков на Мичуринском месторождении ГП «ВостГОК», Украина. Результаты исследований могут быть использованы при подземной разработке рудных месторождений сложной структуры.

Ключевые слова: энергонарушенный горный массив, подземная добыча руд, природоохранная и ресурсосберегающая технология, погашение техногенных пустот.

Благодарность: В создании, совершенствовании и внедрении научных разработок принимали участие и оказывали содействие специалисты следующих организаций:

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

– Государственное предприятие «Восточный горно-обогатительный комбинат» (ГП «ВостГОК»), г. Желтые Воды, Украина;

– Национальный технический университет «Днепровская политехника», г. Днепр, Украина;

– 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;

– Акционерное общество «ВНИПИпромтехнологии», г. Санкт-Петербург, Россия;

– Акционерное общество «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Россия;

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

Для цитирования: Ляшенко В. И., Хоменко О. Е., Голик В. И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):104-118. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-2-104-118.

Development of Environment-Friendly and Resource-Saving Methods of Underground Ore Mining in Disturbed Rock Masses

V. I. Lyashenko[1], O. E. Khomenko[2], V. I. Golik[3]

[1]State Enterprise Ukrainian Scientific Research and Design Institute of Industrial Technologies (SE "UkrNIPIIpromtekhnologii"), Zheltye Vody, Ukraine;
[2]National Technical University "Dneprovskaya Polytechnica", Dnipro, Ukraine;
[3]North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (SKGTU), Vladikavkaz, Russia

Abstract: One of the most problematic aspects in underground ore extraction in mining-disturbed rock masses is backfilling of man-made voids, which affect origination and redistribution of stress-strain state of the rock mass. Their existence in the earth's crust provokes subsidence/collapse of the day surface and also contributes to arising geomechanical and seismic phenomena. The purpose of the study is to substantiate environmental-friendly and resource-saving methods for backfilling of voids in underground ore mining based on revealing the features of rock integrity of the day surface and life-sustaining activity of the population living in the mining-affected area. The main negative consequences of the impact of mining on the environment and humans are high costs for conserving day surface and ensuring life-sustaining activity of the population living in the mining-affected area, as well as removing large areas of land from human activity, etc. Based on the study of a rock mass stress-strain state using geophysical and surveying methods, an environment-friendly method for backfilling of man-made voids in disturbed rock masses is proposed. It enables ensuring the integrity of the day surface and life-sustaining activity of the population living in the mining-affected area (in the vicinity of mines, dumps, sites of backfilling complexes, preconcentration and heap leaching of metals from substandard ores, tailings storage facilities, etc.). Combined geotechnologies are proposed for backfilling of voids during the development of ore deposits by underground block leaching, and scientific and methodological and technical support was provided for drilling and blasting preparation of hard ores and underground leaching of pilot blocks at the Michurinsky deposit of GP VostGOK, Ukraine. The research findings can be used in underground mining of ore deposits of complicated structure.

Keywords: disturbed rock mass, underground ore mining, environmental and resource-saving method, backfilling of man-made voids.

Acknowledgements: Specialists of the following organizations contributed to the creation, improvement and implementation of these research and development:

– State Enterprise "Ukrainian Research and Design Institute of Industrial Technology" (SE "UkrNIPIIpromtekhnologii"), the city of Zheltye Vody, Ukraine;

– State Enterprise "Vostochny Mining and Processing Complex" (SE "VostGOK"), the city of Zheltye Vody, Ukraine;

– National Technical University "Dneprovskaya Polytechnica", Dnepr city, Ukraine

– Institute of Geotechnical Mechanics named after N.S. Polyakov of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnepr city, Ukraine;

– State Higher Educational Institution "Kryvyi Rih National University", Kryvyi Rih, Ukraine;

– Joint-Stock Company VNIPIpromtekhnologii, St. Petersburg, Russia;

– Joint-stock company "VNIMI", St. Petersburg, Russia;

Tselinny Mining and Chemical Complex, Stepnogorsk, the Republic of Kazakhstan.

For citation: Lyashenko V. I., Khomenko O. E., Golik V. I. Development of environment-friendly and resource-saving methods of underground ore mining in disturbed rock masses. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):104-118. (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2020-2-104-118.

Введение

Основными показателями эффективной подземной добычи руд при освоении месторождений сложной структуры являются свойства горного массива и техногенные условия разработки [1, 2]. Ключевым фактором для обеспечения сохранности поверхности при отработке рудных месторождений является фактор заполнения пустот [3, 4]. особенно остро проблема стоит в условиях сложных месторождений, в неоднородных горных массивах с высокой крепостью пород и сложной структурой [5, 6].

Поэтому обоснование природоохранных и ресурсосберегающих технолоий погашения пустот при подземной добыче руд на основе установления закономерностей проявления горного давления массива горных пород для обеспечения жизнедеятельности населения, проживающего в зонах влияния горнодобывающих регионов, является актуальной научной, практической и социальной проблемой, требующей поиска эффективных решений [7]. Данная работа является продолжением исследований с участием авторов, основные научные и практические результаты которых наиболее полно приведены в работах [8, 9].

Цель и задачи

Цель исследования – обоснование природоохранных и ресурсосберегающих технологий погашения пустот при подземной добыче руд на основе установления закономерностей проявления горного давления в массиве горных пород, что позволит обеспечить сохранность дневной поверхности и жизнедеятельность населения, проживающего в зоне влияния горнодобывающего региона.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Проанализировать факторы проявления горного давления в скальных породах массивов сложного строения с высокой интенсивностью разрывных структур.

2. Выявить условия формирования остаточной несущей способности в нарушенных породах в условиях объемного сжатия.

3. Определить условия взрыва на «зажатую» среду, снижения коэффициента разрыхления по мере отбойки слоя горной массы в закрытом объеме и увеличения сейсмического эффекта взрывных колебаний.

4. *Установить* параметры сейсмических колебаний, качество дробления рудного массива и показатель уплотнения зажимающего материала.

5. Разработать природоохранные и ресурсосберегающие технологии погашения пустот при подземной добыче руд в скальных месторождениях в энергонарушенных массивах сложной структуры.

Основные положения

Исследование существующих решений проблемы. Анализ техногенных пустот показывает, что с увеличением глубины разработки рудных месторождений и продолжительности существования камер количество самообрушений пород в них возрастает. Результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что важным 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 [10, 11].

Методы исследований. В ходе исследования использованы методы комплексного анализа и синтеза, практического опыта и научных достижений в областях:

– геотехнологии;

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

– теории и практики взрывного разрушения твердых сред.

Методами моделирования на основе эквивалентных и оптически активных материалов исследовались:

– влияние нарушенности массива на устойчивость выработок, изменение факторов проявления горного давления с увеличением глубины горных работ;

– зависимости деформировано-напряженного состояния нарушенных пород от габаритных размеров выработок.

Также были использованы методы механики сплошных сред, математической статистики и методы исследования волновых процессов [12, 13].

Исследование механизма развития напряжений и деформаций в зоне влияния подземных пустот. В практике использования технологии и технических средств погашения пустот при подземной добыче руд в энергонарушенных массивах наиболее распространены следующие способы (рис. 1).

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 [14, 15].

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 погашения обрушением вмещающих пород характеризуется значительными потерями и разубоживанием и разрушением массива до поверхности [16–18].

Погашение твердеющей закладочной смесью обеспечивает лучшие показатели эксплуатации недр. Основной объем пустот закладывают смесями при одновременной отработке открытым и подземным способами мощных крутопадающих рудных тел месторождений, локализованных в интенсивно нарушенных породах средней устойчивости. Достоинства способа составляют минимальные затраты, сравнительно небольшие потери и разубоживание, доступность для контроля, сохранность вмещающего массива и земной поверхности. К особенностям технологии относятся повышенное требование к полноте представлений о массиве, более детальная его изученность и постоянный геомеханический и сейсмический мониторинг [19, 20]. 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 дневной поверхности по экологическим условиям и повышения безопасности жизнедеятельности в горнодобывающих регионах [21, 22].

Комбинированное погашение пустот при разработке рудных месторождений подземным блочным выщелачиванием (ПБВ) находит применение в развитых горнодобывающих странах мира (рис. 2).

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 [23, 24]. Перспективны геотехнологии, при которых на дневную поверхность выдаются богатые руды, а остальная руда перерабатывается на месте залегания (табл. 1).

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.

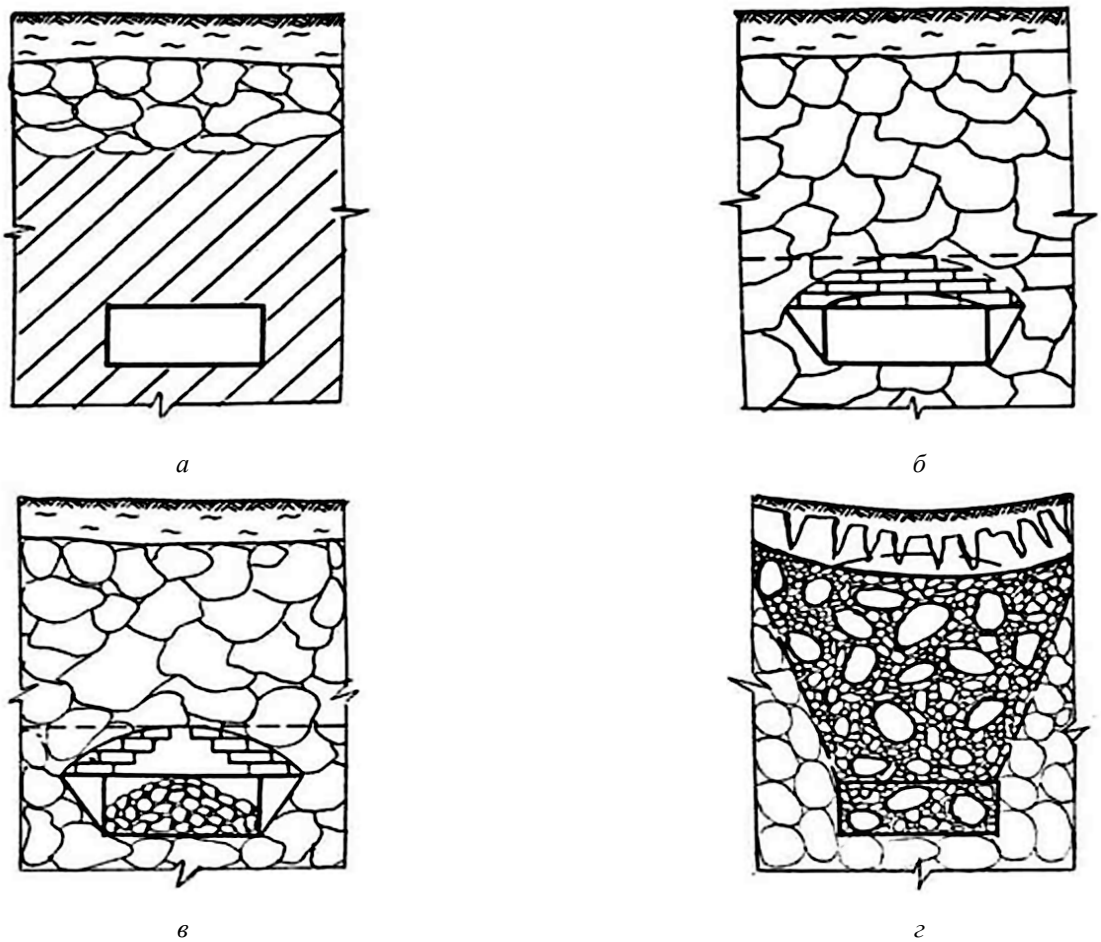

Рис. 1. Влияние пустот на земную поверхность (схемы):
а – перекрытие из прочных пород; *б* – плоская кровля при самоупрочнении пород; *в* – обрушение пород, не достигающее земной поверхности; *г* – обрушение пород с вовлечением в процесс земной поверхности

Fig. 1. The impact of voids on the earth's surface (schematics):
a – overlaying hard rock; *b* – flat roof at rock self-strengthening; *c* – rock collapse, not reaching the earth's surface; *g* – rock collapse involving the earth's surface

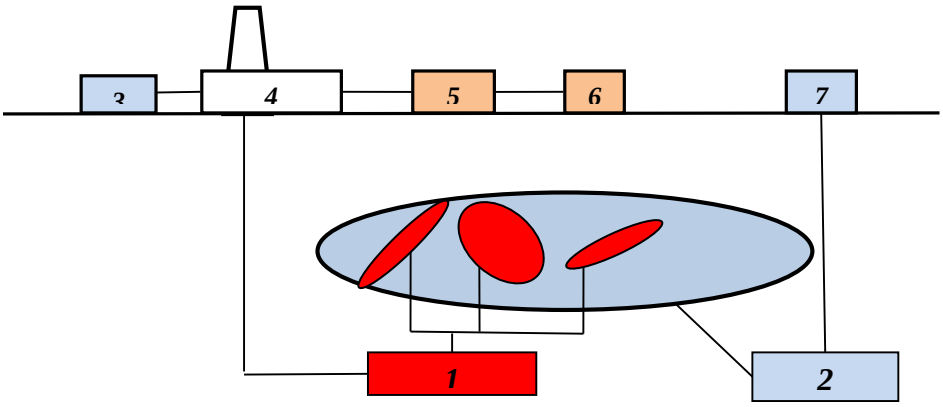

Рис. 2. Комбинированная разработка рудного месторождения:
1, *2* – богатые и бедные по содержанию полезного компонента руды соответственно (неоднородности); *3* – комплекс кучного выщелачивания бедных и забалансовых руд; *4*, *5* – рудоконтрольная и обогатительная станция (РКС) и фабрика (РОФ) соответственно;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

Fig. 2. Combined development of an ore deposit:
1, *2* – rich and poor ores, respectively; *3* – complex for heap leaching of poor and off-balance ores (heterogeneities); *4*, *5* – ore control and concentration plant (CCP) and processing plant (PP), respectively; *6* – stowing complex; *7* – shop for preparation of leaching solutions

Таблица 1

Типизация процессов подземного блокового выщелачивания руд
Typification of underground block leaching processes

Процесс	Параметры процесса	Условия реализации процесса
Дробление руды	Обеспечение крупности +20 мм, –50 мм	Равномерная плотность руды. Возможность создания компенсационного пространства для взрыва
Орошение руды	Скважины в нетронутом 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
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 зарядов, управление эллипсоидом выпуска, анализ ультразвуковых колебаний, электромагнитная обработка растворов. Химические методы: промывка водой с активизирующими добавками, введение химических составов. Биологические методы: использование штаммов бактерий	Получение заданного разрыхления. Увеличение содержания полезного компонента 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	Представительность проб и измерений для всего блока

Создание таких участков провоцирует рост растягивающих напряжений и нагрузки на элементы природно-техногенной системы [25, 26]. Сбалансированное состояние рудовмещающего массива обеспечивается, если блоки ПБВ разгружены от критических напряжений искусственными и естественными массивами.

Практика подготовки запасов рудного месторождения к подземному блочному выщелачиванию

Оценка сейсмического действия взрыва на подземные и поверхностные объекты. В последнее время усложнились условия производства горных работ из-за увеличения глубины отработки, выемки рудных тел под застроенной местностью, наличия охранных целиков в непосредственной близости от земной поверхности. Непременным требованием к ведению горных работ в этих условиях является полная сохранность объектов и земной поверхности, с одной стороны, и обеспечение необходимой производительности – с другой. Безопасность отработки месторождения в значительной степени зависит от характера и интенсивности волновых явлений при взрывах, состояния массива, передающего взрывные сотрясения, поведения различных объектов при взаимодействии с волновыми формированиями при взрывах.

Основным условием сохранения устойчивости горного массива при периодических динамических напряжениях является сохранение объемов среды, т.е. величины напряжений, возникающих при взрывах, не должны вызывать

остаточных деформаций в массиве горных пород. Тогда, исходя из условий сохранности горного массива, величины относительных деформаций при взрыве $E_в$ не должны превышать допустимых $E_д$, т.е.

$$E_д > E_в. \quad (1)$$

Относительные деформации при взрывах с учетом двукратного запаса прочности массива горных пород определяются из выражения

$$E_в = \frac{U_в}{2C_р}, \quad (2)$$

где $U_в$ – скорость смещения при взрывах, см/с; $C_р$ – скорость распространения продольных волн в массиве горных пород, см/с.

Следовательно, для того чтобы обеспечить устойчивость и сохранность массива и окружающей среды, скорость смещения при взрывах не должна превышать допустимую $U_д$, т.е. следует соблюдать условие

$$U_д > U_в. \quad (3)$$

Допустимые скорости колебаний грунта в основании сооружений разных классов в различных породах приведены в табл. 2.

Таблица 2

Допустимые скорости колебаний для сооружений
Permissible vibration velocities for structures

Характеристика горных пород	Крепость пород по Протодьяконову, *f*	Скорость прохождения продольной волны, км/с	Допустимая скорость колебаний, см/с, для сооружений класса			
			I	II	III	IV
Рыхлообломочные отложения, наносы	0,5–1,0	1–2	4,1	8,2	12,2	20,4
Сильно трещиноватые породы с глиной и высокой пористостью	1–3	2–3	6,8	13,6	20,3	34,0
Скальные породы со значительной естественной трещиноватостью	3–5	3–4	9,5	19,0	28,4	47,5
Относительно монолитные породы с отдельными трещинами и пустотами	5–9	4–5	12,2	24,4	36,7	60,0
Монолитные породы, слаботрещиноватые	9–14	5–6	14,9	29,8	44,6	74,5
Очень крепкие породы, монолитные, практически без трещин	14–20	6–7	17,8	35,6	53,3	89,0

Из данных табл. 2 следует, что при соблюдении указанных параметров сохранность поверхности обеспечивается при производстве подземных взрывов, а здания и сооружения, построенные на ней, не будут претерпевать нарушений, так как допустимая скорость смещения (1–3 см/с) для жилых зданий значительно ниже допустимых скоростей для различных горных пород.

Оценка влияния горно-геологических условий на сейсмический эффект взрыва. Анализ полученных ранее инженерно-геологических данных показал, что в геологическом строении участка принимают участие (сверху вниз) почвенно-растительный слой (Q_4), лессовидные суглинки (l_3 $Q_{2–3}$), супеси и суглинки (N_2–Q_1), мелкие среднезернистые пески бучакского яруса (f_2 в). Общая мощность осадочных пород составляет 12–14 м. Осадочные отложения повсеместно залегают по элювию коры выветривания (P_z–M_z) кристаллических пород протерозоя (RR_1). Кора выветривания представлена глинисто-обломочным материалом – первичным каолином, дресвяно- и песчано-глинистым, в зависимости от состава кристаллических пород.

По данным наблюдательных скважин, пробуренных по простиранию залежи, нижняя граница коры выветривания между осями 61–69 находится на глубине 20–24 м от земной поверхности. Кристаллические породы фундамента до 60 м на исследуемом участке представлены альбититами массивной текстуры, средней прочно-

сти, интенсивно катаклазированными и трещиноватыми. Эксплуатационные блоки расположены практически в центре депрессионной воронки, простирающейся в меридианальном направлении вдоль всего месторождения. В результате ведения горных работ уровень подземных вод здесь понижается на 20–30 м ниже гор. 210 м. Горные породы практически не обводнены. Кристаллические породы эксплуатационных блоков 5–84–86 и 5–88–90 представлены мигматитами биотитовыми серого цвета, среднезернистыми с порфировидными выделениями кристаллов полевых шпатов. Встречаются останцы окварцованных биотитовых гнейсов. Порода слаботрещиноватая, плотная, крепкая. Редкие трещины послойные с карбонатом крепостью f = 14–15.

По горно-геологическим условиям блоки находятся между двумя тектоническими разломами. Один разлом – с южной стороны блоков на расстоянии 25–30 м, с северной стороны блоков на расстоянии 40 м – второй разлом. Ширина тектонических разломов колеблется от 5 до 10 м. Указанные тектонические разломы могут служить как зоной поглощения сейсмических колебаний при прохождении волн вкрест простирания разломов, так и волноводами при падении сейсмических волн вдоль нарушений.

По горнотехническим условиям как в сторону охраняемых объектов (дома поселка Кизельгур, Украина), так и в сторону р. Ингул выше блоков 5–84–86 и 5–88–90 находятся отработанные и заложенные блоки, которые при ведении взрывных работ в опытном блоке будут служить зоной поглощения и отражения сейсмических волн. В каждой геологической структуре имеются общие и локальные факторы, влияющие на распространение сейсмических волн. К общим геологическим факторам, которые могут влиять на интенсивность сейсмовзрывных волн, относятся рыхлые отложения, тектонические разломы (последние можно рассматривать как возможные волноводы), угол падения пород. Скорость распространения сейсмических волн определяется степенью трещиноватости массива.

При переходе сейсмической волны в зоны нарушений ее интенсивность может возрастать или уменьшаться. Рыхлые наносные породы являются своеобразным фильтром колебаний в сейсмической волне, когда последняя преломляется в них. Интенсивность колебаний полностью зависит от мощности наносов: чем выше мощность наносов, тем ниже сейсмический эффект. В горном массиве, не затронутом горными работами и не имеющем разломов, сейсмический эффект усиливается. Сейсмический эффект уменьшается в 1,5–2,0 раза при прохождении сейсмических волн через преграду в виде отработанного пространства камер, отработанных и заложенных блоков. Основное влияние на изменение интенсивности сейсмических колебаний оказывают технологические факторы разработки месторождения:

– в тыльной стороне взрыва скорость возмущения массива в 1,5 раза выше, чем во фланговой стороне, и в 2 раза выше, чем в сторону фронта;

– проведение взрывных работ в блоке на нижележащем горизонте после отработки вышележащих блоков и их погашения ведет к уменьшению в 2 раза скорости смещения в сейсмической волне, а при взрыве рядов скважин при формировании отрезной щели – в 1,5 раза;

– прохождение взрывной волны через выработанное пространство уменьшает скорость колебания в 2 раза.

В нашем случае при подготовке эксплуатационных блоков 5–84–86 и 5–88–90 к подземному выщелачиванию взрывные волны будут проходить через разломы и выработанное пространство, что понижает сейсмические колебания в 2 раза и снижает сейсмический эффект в 1,5–2,0 раза, через наносы, что также понижает сейсмические колебания до 2 раз. Оценивая условия отработки эксплуатацион-

ных блоков 5–84–86 и 5–88–90, следует отметить, что физико-механические и гидрогеологические свойства горного массива, наличие отработанных и заложенных блоков, разломов и наносов способствуют сохранности поверхности и жилых домов поселка Кизельгур, благоприятны для производства взрывных работ в блоке.

Расчет допустимой массы зарядов ВВ на одно замедление. Концентрация энергии взрывной волны ВВ в массиве взрываемого слоя при веерном расположении скважинных зарядов распределена неравномерно, причем минимальная нагрузка приходится на концы скважин, а в центральной его части (ближе к устьям скважин) максимальная, что влияет на качество дробления. Поэтому волновые разрушительные процессы, возникающие в результате взрывания ВВ имеют сложную картину, особенно в ближней зоне, не превышающей пяти радиусов взрываемого слоя от его центра.

За пределами этой зоны возможно получить зависимости изменения скоростей смещения, характеризующие разрушительное действие веерного заряда взрываемого слоя руды на одно замедление от его пространственного положения по отношению к защищаемому объекту и расстояния до него. Так как веерный заряд взрываемого слоя является площадным с неравномерным распределением концентрации энергии, пространственное его положение по отношению к защищаемому объекту имеет важное значение наряду с расстоянием до охраняемого объекта.

Устойчивость защищаемых подземных и поверхностных объектов возможна при правильном определении и соблюдении нормативных ограничений, т.е. установлении допустимых скоростей смещения для каждого защищаемого объекта. Охраняемый объект защищен от разрушительных сейсмических воздействий колебаний горного массива и грунтов дневной поверхности при условии, что фактическая скорость смещения колебаний подземных взрывов меньше допустимой, т.е. соблюдается условие

$$U_{ф} \le U_{доп}. \qquad (4)$$

Так как уровень скорости смещения на защищаемом объекте (в среде горного массива в подземных условиях или на грунте дневной поверхности) определяется расстоянием между центром заряда и защищаемым объектом, массой взрываемого ВВ на одно замедление и средой, через которую проходят сейсмические колебания от подземных промышленных взрывов, то для обоснования безопасных зарядов в условиях Мичуринского месторождения ГП «ВостГОК» (Украина) были проведены опытно-промышленные исследования для установления этих зависимостей. Обеспечение устойчивости защищаемых объектов, расположенных в горных массивах (различные горные выработки и подземные камеры, стволы) и на грунтах дневной поверхности, достигается при использовании для расчетов скоростей смещения массивов усовершенствованной авторами известной формулы М.А. Садовского [21]:

$$U = K\frac{\sqrt[3]{Q^{2,08}}}{R^{2,08}}, \text{ см/с}, \qquad (5)$$

где U – скорость смещения, см/с; K – коэффициент пропорциональности, характеризующий свойства среды, проводящей сейсмические колебания и равный при параллельном расположении веерных скважинных зарядов к охраняемому объекту 575, а при торцовом – 145; Q – масса заряда на одно замедление, кг; R –расстояние от центра взрываемого веерными скважинными зарядами слоя на одно замедление до защищаемого объекта, м.

Таким образом, в зависимости от положения взрываемого слоя относительно объекта зависимость имеет вид:

– при параллельном $U = 575\frac{\sqrt[3]{Q^{2,08}}}{R^{2,08}}$, см/с;

– при торцовом $U = 145\frac{\sqrt[3]{Q^{2,08}}}{R^{2,08}}$, см/с.

Из этих зависимостей видно, что при торцовом расположении энергия снижается в

4 раза, что используют при расчетах допустимых зарядов на одно замедление. Расчет допустимых зарядов ВВ на одно замедление при взрывании балансовых запасов эксплуатационных блоков Мичуринского месторождения рекомендуется определять в зависимости от пространственного положения взрываемого рудного слоя к защищаемому объекту по формулам:

– при параллельном расположении $Q = R^3 \frac{\sqrt[3]{U^3}}{K_1^3}$, кг, где K_1=545;

– при торцовом $Q = R^3 \frac{\sqrt[3]{U^3}}{K_2^3}$, кг, где K_2 = 145.

Максимальное допустимое количество ВВ на одно замедление для взрывания запасов эксплуатационных блоков 5–84–86 и 5 –88–90 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Максимальное количество взрывчатых веществ в одном замедлении по блокам

The maximum amount of explosives per blast by block

Номер взрыва, блока	Горизонт, м	Номер веера	Серия замедления, мс	Максимальное количество ВВ на одно замедление, кг
1 взрыв	240-260	3	75	1771
2 взрыв	225-240	1	25	2249
3 взрыв	210-225	5+5а	150	2832
4 взрыв	210-263	1+1+1	50	5594
Блок 5-84-86	225-210	8-8А	150	2777
Блок 5-88-90	263-240	2	50	1969

Количества ВВ на одно замедление при встречном взрывании веерными скважинными зарядами при расчетах скоростей смещения горных массивов (подземные объекты) и скоростей смещения грунтов у основания поверхностных объектов не суммируются, так как направление фронтов сейсмических колебаний после одновременного взрыва нескольких слоев горного массива взаимно противоположно. Максимальное количество ВВ в одном замедлении в блоке 5–84–86 ниже расчетного допустимого значения ВВ для всех защищаемых объектов в дальней зоне, кроме ближних подземных объектов: Вс 59^x, штрека разведочного в осях 59–71 (выработки, камеры, подстанции), расположенных на расстояниях от места взрыва от 22 до 35 м, при необходимости потребуется восстанавливать. В блоке 5–88–90 выше расчетного допустимого для следующих объектов: русло р. Ингул, жилые дома, штрек восточный полевой гор. 210 м, подземная электроподстанция гор. 210 м, Вс 71^x (92^x) гор. 280 м.

Отбойка запасов эксплуатационного блока 5–84–86 по обоснованным параметрам буровзрывных работ обеспечивает улучшение качества дробления. Эффект зажатой среды с оптимальными коэффициентами разрыхления рудной массы в среднем по блоку составляет 1,30, а для блока 5–88–90 – 1,25. Повышенный (ожидаемый) зажим в нижней части указанного блока между горизонтами 260 и 240 м после отбойки всех запасов камеры благоприятно скажется на процессе выщелачивания руд и получения продуктивного раствора.

Таким образом, комбинированное управление геомеханическим состоянием 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 устойчивой плоской кровли.

Внутри обособленных участков могут применяться различные технологии подземной добычи руд. Защита сопряженных участков месторождения от сейсмического воздействия взрыва ВВ производится, например, экранированием. Уровень напряжений в геомеханической системе регулируется инженерными мероприятиями [26, 27]:

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

− предохранительный закладочный массив на границе рудной залежи представляет собой защитную стенку, что позволяет извлекать основные запасы в благоприятных горно-технических условиях;

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

Таким образом, управление массивами осуществляется комбинированным погашением: твердеющими закладочными смесями и изоляцией, а также технико-технологическим обеспечением процессов погашения с использованием природо- и ресурсосберегающих технологий [28, 29].

Анализ результатов исследований и общие рекомендации

На основе исследования механизма возникновения и перераспределения НДС массива пород с использованием геофизических и маркшейдерских методов предложена природоохранная технология погашения пустот в энергонарушенных массивах [30, 31]. Эта технология позволяет обеспечить сохранность дневной поверхности и жизнедеятельность населения, проживающего в зоне влияния горных объектов (шахты, отвалы пустых пород и забалансовых по содержанию полезного компонента руд, промышленные площадки для закладочных комплексов, предконцентрации и кучного выщелачивания металлов из некондиционного рудного сырья, хвостохранилищ и др.). Основными отрицательными последствиями воздействия 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 [32, 33]:

– глубинная переработка техногенных отходов (хвостов обогащения), обладающих большим разнообразием минеральных форм по сравнению с рядовыми 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.

Для переработки техногенных отходов (хвостов обогащения) необходимо создание новых технологий, которые должны базироваться на последних достижениях горной науки. Необходимо выполнять исследования, которые направленны на утилизацию накопленных отходов горно-металлургического производства (ГМП). Внедрение эффективных методов извлечения металлов из отходов позволит улучшить экологическую обстановку в местах их складирования и обеспечит дополнительную добычу геоматериалов для горнодобывающей промышленности. Масштабное вовлечение в производство хвостов обогащения, а также переработка отвалов забалансовых руд на модульных установках способствуют получению дополнительного источника геоматериалов и снижения загрязнения окружающей среды в странах с развитыми горнодобывающими центрами [32, 33].

Также необходимо создавать защитные лесополосы 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 т.д. [34, 35]. 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 таким объектам 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 населенные пункты [36, 37].

Выводы

1. *Отмечено*, что отбойка камерных запасов с заданным качеством дробления с целью эффективного блочного выщелачивания полезного компонента требует повышения зажима рудной массы, где коэффициент разрыхления должен быть в пределах 1,17–1,20. С целью получения заданного качества дробления отрезную щель необходимо располагать в центре блока для использования встречного взрывания при отбойке первых от отрезной щели слоев веерными скважинными зарядами.

2. *Показано*, что для повышения качества дробления за счет увеличения удельного расхода ВВ на отбойку рудного массива до 2,9–3,3 кг/м^3 целесообразно использовать круговые веера скважин диаметром 85 мм, что уменьшает длину скважин и их отклонение от заданного направления между подэтажами. Для получения эффективного качества дробления в блоке следует использовать отбойку на зажатую среду, когда с двух сторон навстречу осуществляют взрыв до восьми слоев, при этом коэффициент разрыхления (зажима) должен находиться в пределах 1,25–1,30.

3. *Доказано*, что использование встречного взрывания рудного массива на отрезную щель позволяет увеличить количество ВВ на одно замедление в 2 раза за счет снижения сейсмического эффекта колебаний после одновременно взрываемых двух вееров скважинных зарядов, разделенных массивом разрыхленной массы в объеме компенсационного пространства. При этом образуются два фронта сейсмических колебаний, направление перемещения которых взаимно противоположно.

4. *Рекомендована* технология отбойки балансовых запасов блока 5–88–90 на основе расчета максимального количества ВВ на одно замедление и после производства замеров скоростей смещения грунтов на дневной поверхности у основания защищаемых объектов при ведении взрывных работ в блоке 5–84–86 при допустимой скорости смещения массива до 0,8 см/с.

Библиографический список

1. Борисов А. А. *Давление на крепь горизонтальных выработок*. М., Л.: Углетехиздат; 1948. 104 с.

2. Ветров С. В. *Допустимые размеры обнажений горных пород при подземной разработке руд*. М.: Наука; 1975. 223 с.

3. Борисов А. А. *Механика горных пород*. М.: Недра; 1980. 359 с.

4. Фисенко Г. Л. *Предельное состояние горных пород вокруг выработок*. М.: Недра; 1980. 359 с.

5. Слепцов М. Н., Азимов Р. Ш., Мосинец В. Н. *Подземная разработка месторождений цветных и редких металлов*. М.: Недра; 1986. 206 с.

6. Авдеев О. К., Пухальский В. Н., Разумов А. Н. Отработка запасов руды в зоне предохранительного целика под водоемом. *Горный журнал*. 1989;(9):28–30.

7. *Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях (объектах строительства подземных сооружений), склонных к горным ударам*. Л.: ВНИМИ; 1989. 58 с.

8. Ляшенко В. И., Хоменко О. Е., Кислый П. А. Повышение сейсмической безопасности подземной разработки скальных месторождений на основе применения новых зарядов взрывчатых веществ. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019;75(8):912–922. DOI: 10.32339/0135-5910-2019-8-912–922.

9. Штеле В. И. *Стенд для моделирования геомеханических процессов в толще горных пород*. Авторское свидетельство 1682559 A1 (СССР); 1991.

10. Nguyen Ngoc Minh, Pham Duc Thang. Tendencies of mining technology development in relation to deep mines. *Mining Science and Technology*. 2019;4(1):16-22. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-1-16-22.

11. *Добыча и переработка урановых руд*. Под общ. ред. А. П. Чернова. Киев: Адеф-Украина; 2001. 238 с.

12. Высоцкая Н. А., Пискун Е. В. Основные факторы неблагоприятного воздействия на окружающую среду деятельности калийного производства и способы ее защиты. Горные науки и технологии. 2019;4(3):172-180. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-172-180.

13. Комащенко В. И., Васильев П. В., Масленников С. А. Технологиям подземной разработки месторождений КМА – надежную сырьевую основу. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2016;(2):101–114.

14. Дмитрак Ю. В., Камнев Е. Н. АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» – Путь длиной в 65 лет. *Горный журнал*. 2016;(3):6–12.

15. Ping Y. J., Zhong C. W., Sen Y. D., Qiang Y. J. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling. Computers and Geotechnics. 2015;64:20–31.

16. Dold B., Weibel L. Biogeometallurgical pre-mining characterization of ore deposits: An approach to increase sustainability in the mining process. *Environmental Science and Pollution Research*. 2013;20(11):7777–7786.

17. Еременко В. А., Лушников В. Н. Методика выбора «динамической» крепи выработок для месторождений склонных и опасных по горным ударам. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(12):5–12.

18. Reiter K., Heidbach O. 3-D geomechanical-numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada). *Solid Earth*. 2014;(5):1123–1149.

19. Goodarzi A., Oraee-Mirzamani N. Assessment of the Dynamic Loads Effect on Underground Mines Supports. In: *30th International Conference on Ground Control in Mining*; 2011. P. 74–79.

20. Соколов И. В., Антипин Ю. Г., Барановский К. В. Исследование конструкции и параметров комбинированной системы разработки наклонного месторождения кварца. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017;328(10):85–94.

21. Садовский М. А. *Геофизика и физика взрыва*. М.: Недра; 1997. 334 с.

22. Смирнов С. М., Татарников Б. Б., Александров А. Н. Влияние геодинамических условий отработки рудного участка на технологию очистных работ с закладкой выработанного пространства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(11):45–51.

23. Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. *Effects of fracture geometry and Wittke W. Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM)*. Verlag: Wilhelm Ernst & Sohn; 2014. 875 p.

24. Shabanimashcool M., Li C. C. Analytical approaches for studying the stability of laminated roof strata. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015;79:99–108.

25. Wang D. S., Chang J. P., Yin Z. M., Lu Y. G. Deformation and failure characteristics of high and steep slope and the impact of underground mining. In: *Transit Development in Rock Mechanics-Recognition, Thinking and Innovation: Proceedings of the 3rd ISRM Young Scholars Symposium on Rock Mechanics*. USA; 2014. P. 451–457.

26. Иофис М. А., Федоров Е. В., Есина Е. Н., Милетенко Н. А. Развитие геомеханики для решения проблем сохранения земных недр. *Горный журнал*. 2017;(11):98–104.

27. Khasheva Z. M., Golik V. I. The ways of recovery in economy of the depressed mining enterprises of the Russian Caucasus. *International Business Management*. 2015;9(6):1210–1216.

28. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzieva O. Metal deposits combined development experience. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;7(6):591–594.

29. Karaman K., Cihangir F., Kesimal A. A. comparative assessment of rock mass deformation modulus. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015;25(5):735–740.

30. Голик В. И., Комащенко В. И., Разоренов Ю. И. Активация компонентов твердеющих смесей при подземной добыче руд. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2017;(3):113–123.

31. Каплунов Д. Р., Радченко Д. Н. Принципы проектирования и выбор технологий освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников. *Горный журнал*. 2017;(11):121–125.

32. Рудмин М. А., Мазуров А. К., Рева И. В., Стеблецов М. Д. Перспективы комплексного освоения Бакчарского железорудного месторождения (Западная Сибирь, Россия). *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018;329(10):87–99.

33. Мухаметшин В. В., Андреев В. Е. Повышение эффективности оценки результативности технологий, направленных на расширение использования ресурсной базы месторождений с трудноизвлекаемыми запасами. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018;329(8):30–26.

34. Lyashenko V. I., Khomenko O. E. Enhancement of confined blasting of ore. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;11:59–72.

35. Lyashenko V., Topolnij F., Dyatchin V. Development of technologies and technical means for storage of waste processing of ore raw materials in the tailings dams. *Technology audit and production reserves*. 2019;49(3):33–40.

36. Lyashenko V., Khomenko O., Topolny F., Golik V. Development of natural underground ore mining technologies in energy distributed massages. Technology audit and production reserves. 2020;51(1):10–17.

37. Ляшенко В. И., Голик В. И., Дятчин В. З. Складирования хвостов в подземное выработанное пространство и хвостохранилище в виде твердеющих масс. *Обогащение руд*. 2020;(1):41–47. DOI: 10.17580/or.2020.01.08.

References

1. Borisov A. A. *Pressure on horizontal working support*. Moscow, Leningrad: Ugletekhizdat Publ.;1948. 104 p. (In Russ.).

2. Vetrov S. V. *Permissible sizes of rock exposures during underground ore mining*. Moscow: Nauka Publ.; 1975. 223 p. (In Russ.).

3. Borisov A. A. *Rock Mechanics*. Moscow: Nedra Publ.; 1980, 359 p. (In Russ.).

4. Fisenko G. L. *Limit state of rocks around mine workings*. Moscow: Nedra Publ.; 1980, 359 p. (In Russ.).

5. Sleptsov M.N., Azimov R. Sh., Mosinets V. N. *Underground mining of non-ferrous and rare metals*. Moscow: Nedra Publ.; 1986. 206 p. (In Russ.).

6. Avdeev O.K., Pukhalsky V.N., Razumov A.N. Ore reserves mining in the zone of protective pillars under a water body. *Gornyi zhurnal*. 1989;(9):28–30. (In Russ.).

7. *Instructions for safe conduct of mining operations at ore and non-metallic deposits prone to rockburst*. Leningrad: VNIMI Publ.; 1989. 58 p. (In Russ.).

8. Lyashenko V. I., Khomenko O. E., Kisly P. A. Improving seismic safety of underground mining based on applying new explosive charges. *Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information*. 2019;75(8):912–922. (In Russ.). DOI: 10.32339/0135-5910-2019-8-912–922.

9. Shtele V. I. *The testing bench for modeling geomechanical processes in rock mass*. Inventor's certificate No. 1682559 A1 (USSR); 1991. (In Russ.).

10. Nguyen Ngoc Minh, Pham Duc Thang. Tendencies of mining technology development in relation to deep mines. *Mining Science and Technology*. 2019;4(1):16-22. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-1-16-22.

11. *Mining and processing of uranium ores*. Chernov A. P. (gen. ed.) Kyiv: Adef-Ukraine Publ.; 2001. 238 p. (In Russ.).

12. Vysotskaya N. A., Piskun E. V. The main factors of adverse environmental impact of potash production and methods of environmental protection. *Mining Science and Technology*. 2019;4(3):172-180. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-172-180. (In Russ.).

13. Komashchenko V.I., Vasiliev P.V., Maslennikov S.A. Preparation of reliable resource base for underground development of KMA deposits. *Izvestija Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*. 2016;(2):101–114. (In Russ.).

14. Dmitrak Yu.V., Kamnev E.N. JSC "Leading Design-and-Survey and Scientific Research Institute of Industrial Technology" – 65 years of development. *Gornyi zhurnal*. 2016;(3):6–12. (In Russ.).

15. Ping Y. J., Zhong C. W., Sen Y. D., Qiang Y. J. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling. *Computers and Geotechnics*. 2015;64:20–31.

16. Dold B., Weibel L. Biogeometallurgical pre-mining characterization of ore deposits: An approach to increase sustainability in the mining process. *Environmental Science and Pollution Research*. 2013;20(11):7777–7786.

17. Eremenko V.A., Lushnikov V.N. Methodology for selecting "dynamic" support for workings at deposits prone to rockburst. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(12):5–12. (In Russ.).

18. Reiter K., Heidbach O. 3-D geomechanical-numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada). *Solid Earth*. 2014;(5):1123–1149.

19. Goodarzi A., Oraee-Mirzamani N. Assessment of the Dynamic Loads Effect on Underground Mines Supports. In: *30th International Conference on Ground Control in Mining*; 2011. P. 74–79.

20. Sokolov I. V., Antipin Yu. G., Baranovsky K. V. Study of design and parameters of the combined system for developing an inclined quartz deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering*. 2017;328(10):85–94. (In Russ.).

21. Sadovsky M. A. *Geophysics and Explosion Physics*. Moscow: Nedra Publ.; 1997. 334 p. (In Russ.).

22. Smirnov S. M., Tatarnikov B. B., Aleksandrov A. N. Selecting method of stoping with backfilling of mine goaf depending on geodynamic conditions of ore mining area. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;(11):45–51. (In Russ.).

23. Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. *Effects of fracture geometry and Wittke W. Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM)*. Verlag: Wilhelm Ernst & Sohn; 2014. 875 p.

24. Shabanimashcool M., Li C. C. Analytical approaches for studying the stability of laminated roof strata. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015;79:99–108.

25. Wang D. S., Chang J. P., Yin Z. M., Lu Y. G. Deformation and failure characteristics of high and steep slope and the impact of underground mining. In: *Transit Development in Rock Mechanics-Recognition, Thinking and Innovation: Proceedings of the 3rd ISRM Young Scholars Symposium on Rock Mechanics*. USA; 2014. P. 451–457.

26. Iofis M.A., Fedorov E.V., Esina E.N., Miletenko N.A. Development of geomechanics for solving the problems of subsoil conservation. *Gornyi zhurnal*. 2017;(11):98–104. (In Russ.).

27. Khasheva Z. M., Golik V. I. The ways of recovery in economy of the depressed mining enterprises of the Russian Caucasus. *International Business Management*. 2015;9(6):1210–1216.

28. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzieva O. Metal deposits combined development experience. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;7(6):591–594.

29. Karaman K., Cihangir F., Kesimal A. A. comparative assessment of rock mass deformation modulus. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015;25(5):735–740.

30. Golik V.I., Komashchenko V.I., Razorenov Yu. I. Activation of hardening mixture components at underground ore mining. *Izvestiâ Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2017;(3):113–123. (In Russ.).

31. Kaplunov D. R., Radchenko D. N. Design principles and selection of subsoil use technologies ensuring sustainable development of underground mines. Gornyi zhurnal. 2017;(11):121–125. (In Russ.).

32. Rudmin M. A., Mazurov A. K., Reva I. V., Stebletsov M. D. Prospects for integrated development of the Bakcharsky iron ore deposit (Western Siberia, Russia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering*. 2018;329(10):87–99. (In Russ.).

33. Mukhametshin V. V., Andreev V. E. Improving evaluation of technologies aimed at optimizing use of resource base of deposits with hard-to-recover reserves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering*. 2018;329(8):30–26. (In Russ.).

34. Lyashenko V. I., Khomenko O. E. Enhancement of confined blasting of ore. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;11:59–72.

35. Lyashenko V., Topolnij F., Dyatchin V. Development of technologies and technical means for storage of waste processing of ore raw materials in the tailings dams. *Technology audit and production reserves*. 2019;49(3):33–40.

36. Lyashenko V., Khomenko O., Topolny F., Golik V. Development of natural underground ore mining technologies in energy distributed massages. *Technology audit and production reserve*s. 2020;51(1):10–17.

37. Lyashenko V. I., Golik V. I., Dyatchin V. Z. Stockpiling of tailings in underground mined-out space and a tailing dump in the form of solidifying masses. *Obogashchenie Rud*. 2020;(1):41–47. (In Russ.). DOI: 10.17580/or.2020.01.08.