ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;(10):131-145

УДК 622.831; 622.2; 622.235 DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-131-145

ОБОСНОВАНИЕ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСНОГО СТЕНДА ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВО ВТОРИЧНЫХ ПОЛЯХ НАПРЯЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОНВЕРГЕНТНЫМИ ГОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

Н.Г. Высотин[1], М.А. Косырева[1], В.И. Лейзер[1], З.В. Аксенов[1]

[1] МГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: prof.eremenko@gmail.com

Аннотация: В качестве экспериментальной проверки сформулированных общих подходов создания и проектирования конвергентных горных технологий в настоящее время проводится комплекс теоретических исследований и виртуальных экспериментов с использованием физических и численных моделей в программном комплексе Map3D. При разработке месторождений конвергентными горными технологиями, например, при формировании в массиве горных пород «каркасных» или сотовых горнотехнических систем, напряженно-деформированное состояние вмещающего горную конструкцию массива будет изменяться в процессе ведения горно-капитальных, горно-подготовительных и очистных работ. Изменения заключаются в росте касательных напряжений и, соответственно, деформировании отдельно взятых элементов и в целом конструкций, уровень которых требуется оценить с высокой степенью достоверности. В аспекте физического моделирования рассматриваются различные применяемые методы в исследовательской практике. С учетом достоинств и недостатков разрабатывается метод физического моделирования природно-технических систем, который основан на применении аддитивных технологий и горных пород для изготовления физических моделей, с учетом принципов теории подобия и размерностей. Рассмотрена адаптация в условиях физического моделирования и калибровка численной модели в методе определения зон нарушенности породного массива вокруг горных выработок и камер.

Ключевые слова: конвергентные горные технологии, горнотехнические системы, физическое и численное моделирование, метод моделирования на эквивалентных материалах, теории подобия и размерности, напряжения, деформации, зоны нарушенности пород ЗНП, программа Map3D.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00034). Руководитель проекта д.т.н., проф. РАН В.А. Еременко, а также исполнители проекта — авторы статьи — выражают благодарность техническому директору ООО «Руссоль» Р.В. Грамма и директору Соль-Илецкого рудника Д.В. Дружкину за предоставленные несколько кубических метров каменной соли (галита) для создания физических моделей горнотехнических систем и проведения лабораторных исследований.

Для цитирования: *Высотин Н. Г., Косырева М. А., Лейзер В. И., Аксенов З. В.* Обоснование создания комплексного стенда для физического моделирования геомеханических процессов во вторичных полях напряжений в условиях разработки месторождений конвергентными горными технологиями // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 10. – С. 131–145. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-131-145.

© Н.Г. Высотин, М.А. Косырева, В.И. Лейзер, З.В. Аксенов. 2019.

Design rationale for engineering multipurpose bench for physical simulation of geomechanical processes in secondary stress fields under conditions of mining with convergent geotechnologies

N.G. Vysotin[1], M.A. Kosyreva[1], V.I. Leyzer[1], Z.V. Aksenov[1]

[1] Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: prof.eremenko@gmail.com

Abstract: By way of experimental validation of general approaches to creation and design of a convergent mining technology, a set of theoretical research and virtual experiments is implemented using physical and numerical models with Map3D software. In mineral mining with convergent geotechnologies, for instance, when constructing frame-like or honeycomb geotechnical structures in rock mass, the stress state of the host rocks will change in the course of accessing, heading and stoping. The changes consist in the increase in the shearing stresses and, accordingly, in deformation of separate elements and whole structures. Thus, the level of the changes is to be determined at high reliability. The physical simulation methods currently in application in research work are reviewed. Considering defined advantages and disadvantages, a method is developed for physical modeling of natural-and-technical systems using additive technologies and making physical models of rocks with regard to the theories of similarity and dimension. The case-study of the physical model and numerical model calibration in detection of damaged rock zones around mine openings and stopes is presented.

Key words: convergent mining technologies, geotechnical systems, physical and numerical modeling, modeling with equivalent materials, theories of similarity and dimension, stresses, strains, damaged rock zone DRZ, Map3D.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 19-17-00034.

Project Manager Dr Tech Sci, Prof RAS Eremenko V. A. and executives—the authors of this article—express their gratitude to Technical Officer of Russol Gramma R. V. and Director of the Sol-Ilets Mine Duzhkin D. V. for the provision of rock salt (halite) blocks for physical simulation of geotechnical systems and for laboratory research.

For citation: Vysotin N. G., Kosyreva M. A., Leyzer V. I., Aksenov Z. V. Design rationale for engineering multipurpose bench for physical simulation of geomechanical processes in secondary stress fields under conditions of mining with convergent geotechnologies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2019;(10):131-145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-131-145.

Введение

Горное дело в настоящее время находится на этапе развития, который характеризуется применением современной высокопроизводительной и безопасной техники. В связи с этим меняются подходы к разработке и эксплуатации месторождений. Следует отметить, что на протяжении нескольких десятилетий системы подземной разработки месторождений остаются традиционными и имеют свои недостатки. При использовании современных горных технологий, основанных на экстенсивных методах преодоления горного давления и избавления от отходов, неизбежной платой за локальную геомеханическую безопасность добычных работ является появление очагов опасных напряжений в налегающих массивах и повышение потерь балансовых запасов в целиках различного размера и назначения [1—9].

Выполненный при проведении исследований анализ геотехнологий, применяемых для подземной добычи минерального сырья (то есть формирования зоны

техногенного разрушения), позволил выделить одну общую для всех случаев особенность развития геотехнологических и геомеханических процессов — добыча полезного ископаемого в зоне техногенного разрушения литосферы и защита этой зоны от последствий геомеханического возмущения прилегающих участков литосферы всегда совмещены по времени. В связи с этим очистная выемка неизбежно включает в себя необходимость выполнения дополнительных процессов, обеспечивающих поддержание динамического равновесия всей горнотехнической системы. Кроме того, при наличии во вмещающих породах флюидонесущих коллекторов, например, с водой, горные работы всегда оказываются незащищенными от их проявлений со всеми вытекающими отсюда последствиями [10, 11].

Таким образом, при развитии геотехнологий всегда имеет место локальное противоречие между необходимостью и возможностью изменения геотехнологий при изменении условий разработки, влияние которого усложняет ведение добычных работ при использовании любой из традиционно применяемых горных технологий. В этих условиях обеспечение геомеханической безопасности связано с решением фундаментальной проблемы по преодолению влияния антропогенного разрушения литосферы на процессы, протекающие в ее динамических структурах. Целью научно-исследовательской работы, проводимой в настоящее время при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00034), являются практикоориентированные исследования по созданию методологии построения принципиально новых горных технологий на основе идей по развитию природоподобных технологий [12, 13].

В связи с этим на современном этапе развития необходимо решить научно-технические задачи, связанные с разработкой новых технологий освоения месторождений твердых полезных ископаемых. Одной из концепций развития новых геотехнологий является разработка и применение конвергентных горных технологий [13, 14], создание в разрабатываемых массивах природоподобных горнотехнических систем, которые способны обеспечить безопасность и повысить эффективность горных работ, в т.ч. в сложных горно-геологических условиях, а также при освоении глубоких горизонтов месторождений.

Конвергентные (природоподобные) горные технологии — это горные технологии, которые разрабатываются на основе сближения (конвергенции) горных и не горных технологий (наук), в первую очередь горных и природных систем [13, 14].

Массив горных пород — это особенная физическая среда, которая сложна по строению и значительно различается по физико-механическим свойствам. Для создания горнотехнических условий, позволяющих вести высокопроизводительные и безопасные горные работы, необходимо расширять выбор технологических схем и типов горных выработок. Все это создает трудности при освоении месторождений твердых полезных ископаемых подземным способом. В мировой горной практике накоплен большой многолетний опыт ведения горных работ, но до сих пор не определены единые законы и закономерности поведения массива горных пород, нарушенного выработками, его взаимодействия с инженерными сооружениями. При этом научное сообщество и бизнес продолжают исследования в этой области — от натурных наблюдений до теоретических и аналитических обоснований.

Горные инженеры, как правило, используют эмпирические методы, например, основанные на ограниченных полевых данных при расчете смещений и

напряжений в зонах влияния выработок. Данные методы предполагают условия плоской деформации и часто не учитывают динамику процесса строительства горной выработки в объемном исполнении.

При применении численного моделирования можно проводить более реалистичный анализ, учитывающий взаимодействие элементов горнотехнических конструкций, последовательность строительства выработок и их влияние на объемное изменение геомеханических процессов. Исследование методами полевых испытаний позволяет получить необходимую информацию. Однако существует сложность использования этих методов в интерпретации данных, кроме этого, полевые исследования ограничены затратами на техническое обеспечение и проблемами безопасности, которые препятствуют доступу в выработки в зоны нарушенности массива и обрушения.

Таким образом, полномасштабные исследования отличаются большой стоимостью, сложностью проведения и ограниченностью повторов исследования в схожих горно-геологических и геомеханических условиях.

Зоны нарушенности пород

Первым вопросом, с которым сталкиваются горные инженеры, является определение глубины и интенсивности зон нарушенности пород ЗНП [15]. Существуют точные методы измерения ЗНП, например, лазерный каротаж, спектральный анализ поверхностных волн, межскважинное сейсмическое и ультразвуковое просвечивание. Однако из-за сложности эти методы используют на ограниченных участках шахты. Наиболее распространенными методами являются бурение измерительных (наблюдательных) скважин, бурение скважин с отбором и анализом керна или разведочное (пробное) бурение, при котором опытный бурильщик способен фиксировать переход состояния массива от разрушенного к монолитному. Применяют также ленточный экстензометр для измерения конвергенции между боковыми стенками выработки.

Для численного эксплицитного моделирования ЗНП наиболее приемлемы методы дискретных элементов (МДЭ) с использованием, например, программного обеспечения UDEC, 3DEC, PFC, EDEM и др. или конечных элементов (МКЭ) с такими программами, как FLAC, Abaqus ELFIN, Plaxis и др. Зона пластичной деформации моделируется в прямой форме и достаточно точно отображает реальный механизм разрушения слоистого массива горных пород. Свойства породного массива, необходимые для введения в численную модель, очень сложно определить с приемлемой точностью вследствие большого количества погрешностей, например на дискретную, неоднородную, анизотропную, неупругую природу массивов горных пород или на величину и направления действия главных природных напряжений, что значительно снижает достоверность результатов моделирования. Общая погрешность определяется через коэффициент вариации из выражения:

$$C = \sqrt{C_1^2 + C_2^2 + C_3^2 + C_4^2 + C_5^2 + C_6^2}\ , \quad (1)$$

где C — суммарный вариационный коэффициент; C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 и C_6 — коэффициенты погрешности, учитывающие, соответственно, геометрию выработки, геологические параметры, природное напряженное состояние, свойства горных пород, вид моделирования (линейное или нелинейное), а также разрешающую способность модели.

Коэффициент вариации обычно находится в пределах от 40% (при высокой достоверности данных о свойствах горных пород и напряжениях) до 60% (в обычном случае).

Рис. 1. Наблюдательный метод Терзаги, применяемый к проектированию рудника (а) и численному моделированию (б)
Fig. 1. The observation method proposed by Terzaghi in mine design (a) and in numerical modeling (b)

В натурных условиях (на руднике), как правило, недостаточно ресурсов для проведения большого числа испытаний горных пород и анализа их состояния с целью определения параметров, необходимых для сложного нелинейного численного моделирования методами МДЭ или МКЭ. Альтернативой детальной количественной оценки входных параметров модели является ретроспективный анализ отклика массива на проведение выработки, основанный на так называемом наблюдательном методе Терцаги (рис. 1, *а*) [16] с использованием линейного (упругого) моделирования методом граничных элементов (МГЭ), программных пакетов, например Map3D, Examine3D и др., и с адаптацией метода Терцаги к линейному моделированию (рис. 1, *б*). По мере развития горных работ модель становится все более и более откалиброванной. Традиционно отклик горных пород на проведение выработки наблюдают визуально или с помощью инструментов. Хорошо откалиброванная модель позволяет осуществлять обоснованно достоверный прогноз поведения массива горных пород.

Недостатком известных в настоящее время классических и недавно разработанных критериев разрушения нетронутых массивов горных пород является учет только максимальных и минимальных главных напряжений, что определяет преимущественно сдвиговый механизм разрушения. В натурных же условиях, особенно в глубоких рудниках, вокруг выработок наблюдаются возникшие слои параллельных трещин. Этот тип разрушений называют растрескиванием (рис. 2).

В настоящее время общепризнано, что эти трещины, называемые трещинами растяжения, возникают под действием очень высоких сил сжатия, а разрушения относятся не к сдвигу, а к растяжению [15]. Происходит процесс второстепен-

Рис. 2. Дугообразные трещины растяжения (растрескивание) в своде очистной выработки
Fig. 2. Arch-wise extension fractures (spalling) in stope roof

ного растяжения, хотя все три главных компонента напряжения — сжимающие. Этот процесс определяется критерием растягивающей деформации, согласно которому порода начинает разрушаться при всестороннем сжатии, когда вторичное растягивающее напряжение превышает определенный предел, свойственный данной породе, т.е.

$$\varepsilon_3 \geq \varepsilon_c, \qquad (2)$$

где ε_3 — растягивающая деформация; ε_c — предельное (критическое) значение растягивающей деформации.

Растягивающая деформация возникает в направлении действия минимального главного напряжения и описывается уравнением:

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} \cdot \left[\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2) \right], \qquad (3)$$

где σ_1, σ_2, σ_3 — главные напряжения, E — модуль Юнга нетронутых пород, ν — коэффициент Пуассона.

Трещины растяжения образуются в плоскостях, перпендикулярных направлению действия минимального главного напряжения. Критерий растягивающей деформации применим для горных пород — от очень крепких и хрупких до мягких. Но в ЗНП трещины растяжения вступают во взаимодействие с природными нарушениями сплошности массива и могут вызвать значительные вывалы.

Планы измеренных расстояний до трещин совместили с контурами растягивающей деформации, полученными трехмерным МГЭ-моделированием в программе MapSD. Путем варьирования упругих свойств горных пород (E и ν) достигается соответствие между контурами деформаций растяжения и планами расстояний до трещин. В результате такой калибровки определяется критерий разрушения по механизму растяжения для конкретного участка рудника.

Элементами подземных горных конструкций применяемых систем разработки кроме выработок также являются камеры, очистные пространства и пр. Понимание процессов и масштабов формирования ЗНП вокруг камер и других выработанных пространств позволяет проводить достоверную оценку устойчивости массива горных пород планировать горные работы, влиять на процесс разубоживания руды, выбирать тип крепи и пр.

Вследствие перераспределения напряжений при нарушении сплошности массива формируются зоны концентрации сжимающих напряжений, действующих вблизи контура по всему периметру обнажения отрабатываемой камеры или рудного участка. Их наличие определяется методами кернового бурения, реперными станциями и др. На границе выработанного пространства наблюдаются смещения, из-за неравномерности которых происходит деформирование массива и изменение его напряженного состояния. В этих областях механические процессы под воздействием техногенных факторов происходят с большей интенсивностью. Наибольшее влияние на массив горных пород оказывают взрывные работы.

Местоположения зон неупругих деформаций, полученных методами граничных интегральных уравнений, подтверждаются результатами проведенных экспериментальных исследований в натурных условиях с применением различных методов контроля напряженно-деформированным состоянием массива горных пород.

Калибровка моделей осуществляется методами по дискованию керна, деформационным (глубинные и контурные репера), микросейсмоакустическим, при помощи данных сейсмомониторинга и др. В результате проведения калибровки разрабатывается критерий разрушения для конкретного рудного участка.

Формирование ЗНП вокруг камер, очистного и выработанного пространст-

ва представляет собой сложную картину, так как отработка рудных тел, как правило, ведется одновременно на нескольких этажах в различном порядке. Построение трехмерных откалиброванных моделей, например, с помощью программы MapЗD, позволяет планировать горные работы с минимизацией процессов развития ЗНП, а также выбирать необходимый тип крепь для обеспечения безопасности производства.

Теоретичекая основа физического моделирования геомеханических процессов для условий применения конвергентных горных технологий

В научно-исследовательском центре «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии» Горного института НИТУ «МИСиС» в рамках выполнения работ по проекту Российского научного фонда создан комплексный стенд для проведения физического и оптического моделирования геомеханических процессов во вторичных полях напряжений при разработке месторождений различных геологических типов новыми горными технологиями.

В качестве экспериментальной проверки сформулированных общих подходов создания и проектирования конвергентных горных технологий в настоящее время проводится комплекс теоретических исследований и лабораторных экспериментов с использованием физических и численных моделей в программном комплексе MapЗD. В результате было установлено, что при формировании в горном массиве достаточно крупной неоднородности (например — отрабатываемого участка рудного тела) условия воспроизводства устойчивых динамических структур в литосфере будут определяться только релаксационными процессами на внешнем контуре неоднородностей [13, 14]. Поэтому опережающее формирование этого контура открывает реальную возможность преодоления обозначенного выше локального противоречия за счет того, что при формировании и развитии зоны техногенного разрушения процессы добычи полезного ископаемого и защиты от последствий геомеханических возмущений литосферы разделяются во времени.

Это положение составляет содержание геомеханической основы разработки конвергентных горных геотехнологий, которая заключается в опережающем выделении зоны техногенного разрушения литосферы из общего поля вторичных изменений геомеханического состояния массива за счет разделения во времени процессов добычи полезного ископаемого и процессов преодоления последствий геомеханического возмущения прилежащих участков литосферы.

Опережающее формирование внешних контуров отрабатываемых участков, блоков, камер путем создания каркасной объемной конструкции открывает совершенно новые возможности при выборе технологии очистной выемки, делая этот выбор независимым от развития поля вторичных изменений геомеханического состояния массива. Тогда можно геотехнологическую идею каркасного варианта конвергентной горной технологии сформулировать так: принципиально новые возможности повышения безопасности и эффективности достигаются путем целенаправленной компоновки во времени и пространстве известных горных технологий с различными характеристиками.

Получение необходимых и достаточных объемов информации о физико-механических свойствах горных пород в наглядной физической модели [17] и цифровом представлении значительно упрощает интерпретацию результатов исследований [18].

Поэтому одной из важных задач создания новой геотехнологии наряду с ком-

пьютерным моделированием является экспериментальное исследование, т.е. разработка физических моделей и их испытание с целью оценки моделируемого напряженно-деформированного состояния разрабатываемых горнотехнических систем. Рассмотренный во втором разделе статьи подход по определению глубины и интенсивности зон нарушенности пород ЗНП в натурных условиях и их калибровке применяется для калибровки численных моделей проектируемых природоподобных горнотехнических систем на основе полученных результатов физического моделирования, а также в дальнейшем при проектировании и эксплуатации данных систем при освоении месторождений твердых полезных ископаемых.

Методы физического моделирования до сих пор актуальны, несмотря на большие вложения в экспериментальную базу. Численные модели имеют ограничения для корректной реализации напряженно-деформированного состояния, на которое влияют нелинейность упругих и анизотропия прочностных свойств, изменение структурной неоднородности. Таким образом, физические модели все также могут быть применены для калибровки численных моделей и проектирования параметров разрабатываемых горнотехнических систем.

В научно-исследовательской практике были разработаны различные методы физического моделирования для изучения влияния напряжений на деформационные характеристики конструктивных элементов модели и на общее напряженно-деформированное состояние. Физическое моделирование использует теорию подобия и теорию размерности.

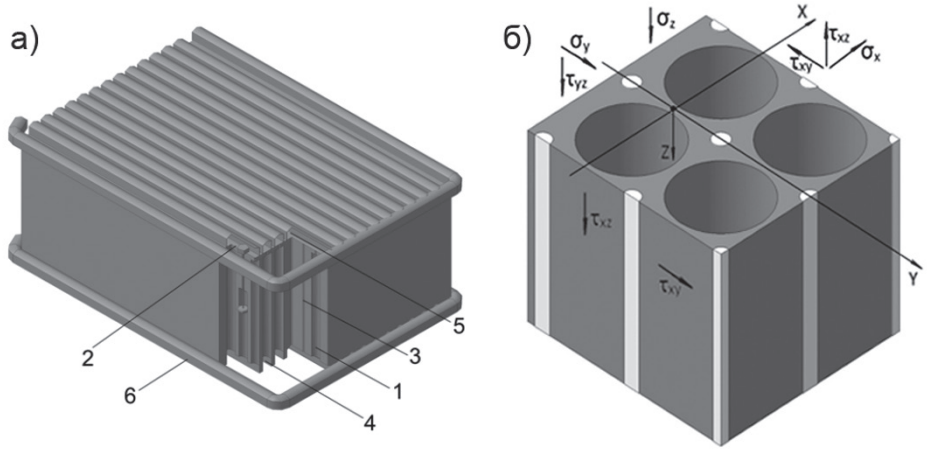

Рис. 3. Модель проектируемой конвергентной природоподобной геотехнологии — выемочного участка месторождения камерно-целиковой системой разработки в сотовом исполнении с параллельным расположением очистных камер (а) и расчетная схема геомеханических характеристик физической модели с междублоковыми целиками (б): 1 — очистные камеры круглого сечения; 2 — буровая установка для очистной выемки; 3 — пилотные скважины очистных камер; 4 — выработки концентрационного горизонта; 5 — выработки вентиляционно-бурового горизонта; 6 — кольцевой панельный штрек; *Z, X, Y* — оси координат; σ_z, σ_x, σ_y — главные нормальные напряжения, МПа; τ_{xy}, τ_{xz}, τ_{yz} — касательные напряжения, МПа

Fig. 3. Nature-like convergent geotechnology model—honeycomb structure of room-and-pillar mining with parallel arrangement of stopes (a) and analytical model of geomechanical characteristics of physical analog with interblock pillars (b): 1— circular cross-section stopes; 2— drilling installation; 3— pilot stoping holes; 4— openings on accumulation horizon; 5— openings on drilling and ventilation horizon; 6— annular panel drift; *(Z, X, Y)*— coordinate axes; σ_z, σ_x, σ_y— principal normal stresses, MPa; τ_{xy}, τ_{xz}, τ_{yz}— shearing stresses, MPa

Согласно этим теориям требуется определить свойства самого геоматериала и модели, количественные параметры напряжений деформаций, способ приложения нагрузок, способ построения модели, граничные условия, контроль и пр.

Задание условий испытаний и определение физико-механических характеристик позволяет определить, как будут происходить геомеханические процессы в физической модели. В представленной научной работе обсуждаются методы построения различных физических моделей и их условия, а также параметры, которые необходимо точно определить.

Для исследования напряженно-деформированного состояния массива, в котором формируется природно-техническая система (рис. 3) [19] предлагается использовать комплексный метод на основе физического и численного моделирования [20].

Комплексный метод включает:

- физическое моделирование на природных и искусственных материалах;
- проведение численного моделирования с помощью программного комплекса MapЗD;
- сопоставление результатов лабораторных испытаний и цифровой модели, калибровка модели.

Основой физического моделирования геомеханических процессов является уменьшение размеров исследуемой структуры при сохранении условий геометрического и механического подобия. Линейные размеры и напряжения — базовые параметры, связанные с физическими моделями. Следует отметить, что простое масштабирование линейных размеров усложняет задачу приложения соответствующих напряжений. Поэтому задача решается при должном соотношении действующего напряжения и размеров. Способы приложения напряжений, а также способы достижения геометрического сходства зависят от ожидаемых результатов экспериментов, а именно как среагирует модель (м).

Определены три категории физической модели в соответствии с целью, для которой эта модель используется:

- Категория I — модели, используемые исключительно для прогнозирования поведения конкретной структуры в натурных условиях (н);
- Категория II — модели, построенные в виде небольших натурных структур, так чтобы поведение модели можно было сравнить с результатами, полученными методом математического анализа;
- Категория III — модели, используемые в исследовательских целях для лучшего понимания поведения геоматериала.

Первые две категории обычно используются в инженерной практике, хотя в долгосрочной перспективе результаты третьего типа моделей могут привести к существенному прогрессу в науке о геомеханике, позволяющей применять эффективные методы проектирования.

Методы теорий подобия и размерностей имеют свою математическую основу в принципах механики. Обеспечение прямого сравнения натуры и ее модели связано с тем, что геометрические и силовые характеристики должны быть преобразованы в безразмерные параметры для расчета соответствующего коэффициента масштабирования:

$$\mu = \gamma_н / \gamma_м \lambda, \qquad (4)$$

где μ — масштаб напряжений; λ — линейный масштаб моделирования; $\gamma_м$ — удельный вес модели; $\gamma_н$ — удельный вес натурный.

Для реального подобия разрабатываемая модель должна быть описана как функционал всех соответствующих параметров. Как только функционал, включающий *n* величин, идентифицирован, теорема Бакингема говорит о том, что если существует *q* фундаментальных величин, то число *m* независимых отношений *w* определяется как $m = n - q$, и может

быть определен измененный функционал, в котором включены только существенные безразмерные отношения. Бассетт [21] констатировал, что «размерный анализ позволяет экспериментатору осознать те факторы, которые игнорируются моделью», и что отклонения от полного подобия должны быть обоснованы и, если возможно, компенсированы аналитически [22].

Так как горные породы — это структурно-неоднородные физические системы, то по возможности эти неоднородности должны учитываться в физических моделях и калиброваться в численной модели напряженно-деформированного состояния в случае исследования горной породы как упруго-пластичной системы. При этом в уравнение состояния включаются нелинейные параметры упругих свойств [23].

В работе [22] предположили, что более продуктивным подходом может быть использование материалов, представляющих наилучшие и наихудшие вероятные состояния в прототипе, и режима нагрузки, которые позволят использовать результаты моделирования в качестве предельных параметров для оценки ситуации с прототипом.

Методы физического моделирования

В настоящее время известны такие методы физического моделирования, как моделирование на эквивалентных материалах (ЭМ), оптический метод, метод центробежного моделирования, а также использование самой горной породы в качестве модельного материала. Каждые из них имеют свои достоинства и недостатки различного характера [25, 26].

Самый широко распространенный метод физического моделирования — это построение модели на ЭМ, то есть на материалах, заменяющих заменяют горные породы, необходимые физико-механические свойства которых для исследований в определенных соотношениях масштабируются. Преимущество данного метода заключается в измерении параметров напряженно-деформированного состояния модели, которые в натурных условиях измерить невозможно. Основным достоинством метода является использование в качестве модельного материала горной породы ее самоподобия строению массива горных пород.

Оптический метод позволяет определять параметры напряженно-деформированного состояния массива и сооружаемых в нем конструкций, когда деформации не вызывают нарушение сплошности модели [25].

На современном этапе развития науки и техники для физического моделирования геомеханических процессов в рамках проводимых работ по проекту Российского научного фонда осуществляется применение аддитивных технологий, имеющих широкие возможности для изготовления физических моделей [27, 28]. Положительные стороны предлагаемых технологий заключаются в управлении свойствами изготавливаемой модели, а также структурой, формой и размерами.

Задачи физического моделирования напряженно-деформированного состояния создаваемой горнотехнической конструкции

Одним из основных факторов, влияющих на устойчивость горнотехнических конструкций, являются действующие во вмещающем массиве выработок напряжения. Действующие напряжения имеют величины, которые зависят от физико-механических свойств, от горного и порового давления.

В естественном состоянии массив горных пород находится в условиях дей-

ствия горного давления, вертикальных (субвертикальных) и горизонтальных (субгоризонтальных) напряжений.

При разработке месторождений конвергентными горными технологиями, например, при формировании в массиве горных пород «каркасных» или сотовых горнотехнических систем, напряженно-деформированное состояние вмещающего горную конструкцию массива будет изменяться в процессе ведения горно-капитальных, горно-подготовительных и очистных работ. Изменения заключаются в росте касательных напряжений и, соответственно, деформировании отдельно взятых элементов и в целом конструкций, уровень которых требуется оценить с высокой степенью достоверности.

Для моделирования геомеханических процессов, происходящих во вмещающем массиве выработок и камер, в целиках необходимо определить, какие нагрузки приложить к модели, составить алгоритмы деформирования в несколько этапов и провести параллельный мониторинг.

Оценка влияния трещиноватости массива на моделируемые процессы

При оценке напряженно-деформированного состояния трещиноватого скального массива горных пород, находящегося в естественных условиях, существуют две проблемы.

Во-первых, изменение напряженно-деформированного состояния массива определяется значительным разнообразием типов и размеров трещин, а также шероховатостью их поверхностей. Данные условия усложняют сравнения результатов испытаний различных образцов горных пород, даже если они имеют одинаковые свойства.

Во-вторых, лабораторные исследования проводятся на небольших образцах, механизм разрушения в них отличается от разрушения трещиноватого массива горных пород, что предопределяет задачу перевода лабораторных данных в полевые условия.

Учитывая, что образцы горных пород не являются репрезентативными для массива горных пород, необходимо выбрать контролируемую физическую модель трещиноватых горных пород. Для проведения исследований физическая модель должна включать набор до трех взаимно ортогональных систем трещин. Образцы, которые изготавливаются в настоящее время на 3D принтере в научно-исследовательском центре, представляют собой идентичные кубические блоки из полимеров. Контакты между этими блоками моделируют три набора ортогональных трещин. Шероховатость поверхностей кубических блоков повторяет шероховатость естественных трещин. Несмотря на то, что шероховатость блоков определяется способом их изготовления, изменения шероховатости, вызванные нагрузками, можно контролировать, измеряя ее до и после испытания [24].

Заключение

В целях разработки конвергентных геотехнологий представлено обоснование создания комплексного стенда для физического моделирования геомеханических процессов во вторичных полях напряжений.

Изучая вопрос физического моделирования природно-технических систем рассматриваются различные применяемые методы в исследовательской практике, с учетом их достоинств и недостатков разрабатывается метод физического моделирования.

Метод основывается на применении аддитивных технологий (3D-печать) и горных пород как материала для изготовления физических моделей при моделировании геомеханических процессов. При этом учитываются явления самопо-

добия строения горных пород и условия подобия.

Метод определения зон нарушенности породного массива вокруг горных выработок и камер с помощью численного моделирования адаптируется для условий физического моделирования и калибровки соответствующих численных моделей, а также контроля за формированием зон нарушенности конструктивных элементов создаваемых новых и традиционных моделей горнотехнических систем, которые подвергаются различным нагрузкам, создаваемым на комплексном стенде.

Хорошо откалиброванная модель позволяет на стадии проектирования горных работ прогнозировать поведение массива горных пород в зоне и вне зоны ведения очистных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Myaskov A. V., Kosyreva M. A.* Solution of geoecological problems in underground mining of deep iron ore deposits // Eurasian Mining. 2018. No 1. pp. 35—40.

2. *Еременко В. А., Гахова Л. Н., Семенякин Е. Н.* Формирование зон концентрации напряжений и динамических явлений при отработке рудных тел Таштагольского месторождения на больших глубинах // ФТПРПИ. — 2012. — № 2. — С. 80—87.

3. *Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А.* Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.

4. *Борщ-Компониец В. И., Макаров А. Б.* Горное давление при отработке мощных пологих рудных залежей. — М.: Недра, 1986. — 271 с.

5. *Еременко В. А., Гахова Л. Н., Есина Е. Н., Зинченко Д. Н.* Особенности геомеханического обеспечения освоения глубокозалегающих железорудных месторождений // Горный журнал. — 2014. — № 5. — С. 74—78.

6. *Казикаев Д. М., Козырев А. А., Каспарьян Э. В., Иофис М. А.* Управление геомеханическими процессами при разработке месторождений полезных ископаемых: Учебное пособие. — М.: Изд-во «Горная книга», 2016. — 490 с.

7. *Козырев А. А., Семенова И. Э., Журавлева О. Г., Пантелеев А. В.* Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018 // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 12. — С. 74—83.

8. *Зубов В. П.* Применяемые технологии и актуальные проблемы ресурсосбережения при подземной разработке пластовых месторождений полезных ископаемых // Горный журнал. — 2018. — № 6. — С. 77—83.

9. *Сидоров Д. В., Пономаренко Т. В., Ларичкин Ф. Д., Воробьев А. Г.* Экономическое обоснование инновационных решений по снижению потерь сырья в алюминиевой отрасли России // Горный журнал. — 2018. — № 6. — С. 65—68.

10. *Хажыылай Ч. В., Еременко В. А., Косырева М. А., Янбеков А. М.* Влияние порового давления на напряженно-деформированное состояние массива горных пород в условиях применения конвергентных горных технологий / Труды Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых с элементами научной школы «Горняцкая смена–2019» 24.06—27.06.2019. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2019.

11. *Хажыылай Ч. В., Еременко В. А., Косырева М. А., Янбеков А. М.* Расчет паспорта прочности горных пород находящихся в естественных условиях массива с использованием критерия Хука-Брауна и программы RocData // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 12. — С. 92—101.

12. *Ковальчук М. В., Нарайкин О. С., Яцишина Е. Б.* Конвергенция наук и технологий — новый этап научно-технического развития // Вопросы философии. — 2013. — № 3. — С. 3—11.

13. *Трубецкой К. Н., Мясков А. В., Галченко Ю. П., Еременко В. А.* Обоснование и создание конвергентных горных технологий подземной разработки мощных месторождений твердых полезных ископаемых // Горный журнал. — 2019. — № 5. — С. 6—13.

14. *Еременко В. А., Мясков А. В., Галченко Ю. П.* Оценка возможностей создания природоподобных технологий разработки месторождений / Материалы X международной научно-технической конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологиче-

скому укладу» 27.05—31.05.2019. — Магнитогорск: РАН, РФФИ, ИПКОН РАН, МГТУ им. Г.И. Носова. — 2019. — С. 102—109.

15. *Лушников В.Н., Сэнди М.П., Еременко В.А., Коваленко А.А., Иванов И.А.* Методика определения зоны распространения повреждения породного массива вокруг горных выработок и камер с помощью численного моделирования // Горный журнал. — 2013. — № 12. — С. 11—16.

16. *Terzaghi K., Peck R.B.* Soil mechanics in engineering practice. Wiley. New York. 1967.

17. *Jiang Q., Feng X., Song L., Gong Y., Zheg H., Cui J.* Modeling rockspecimens through 3D printing: Tentative experiments and prospects // Acta Mechanica Sinica. 2015. 32(1).pp. 524—535.

18. *Глушихин Ф.П., Кузнецов Г.Н., Шклярский М.Ф.* Моделирование в геомеханике. — М.: Недра, 1991. — 240 с.

19. *Еременко В.А., Мясков А.В., Галченко Ю.П., Ромеро Барренечеа Мойсес Эсау, Лагутин Д.В.* Обоснование параметров конвергентной геотехнологии в условиях отработки Илецкого месторождения каменной соли // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2018. — Т 5. — С. 37—48.

20. *Риб С.В., Говорухин Ю.М.* Разработка комплексного метода исследования геомеханических процессов при интеграции физического и численного моделирования // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2018. — № 2. — С. 363—378.

21. *Basset R.H.* The use of physical models in design / General Report, Proc. VII European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton, U.K. Vol. 5, pp. 253—270.

22. *Dunbavan M.* Physical models in geomechanics Lect. Series No.53 1982 James cook University. Australia.

23. *Винников В.А., Высотин Н.Г.* Методика проведения испытаний по определению статического модуля упругости горных пород с использованием результатов лазерно-ультразвуковой спектроскопии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — ОВ 1. — С. 90—101.

24. *Zou L., Tarasov B.G., Dyskin A.V., Adchikary D.P., Pasternak E., Xu W.* Physical Modelling of Stress-dependent Permeability in Fractured Rocks // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2013. Vol. 4. pp. 67—81.

25. *Баклашов И.В., Картозия Б.А., Шашенко А.Н., Борисов В.Н.* Геомеханика Т. 2 Геомеханические процессы. — М.: Изд-во МГГУ, 2004. — 249 с.

26. *Кузьмин Ю.О., Жуков В.С.* Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. — М.: Изд-во МГГУ, 2004. — 262 с.

27. *Kong L., Ostadhassan M., Li C., Tamimi N.* Rock Physics and geomechanics of 3D printed Rocks / ARMA 51st U.S. Rock Mechanics. Geomechanics Symposium, San Francisco, California, USA, 2017, pp. 1—8.

28. *Gell E.M.*, Walley S. M, *Braithwaite C.H.* Review of the Validity of the Use of Artificial Specimens for Characterizing the Mechanical Properties of Rocks // Rock Mechanics and rock Engineering, 2019, no. 3, pp. 1—13. ГИАБ

REFERENCES

1. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Myaskov A. V., Kosyreva M. A. Solution of geoecological problems in underground mining of deep iron ore deposits. *Eurasian Mining*. 2018. No 1. pp. 35—40.

2. Eremenko V. A., Gakhova L. N., Semenyakin E. N. Initiation of stress concentration zones and dynamic events in deep-level mining at Tashtagol ore body. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2012, no 2, pp. 80—87. [In Russ].

3. Kurlenya M. V., Seryakov V. M., Eremenko A. A. *Tekhnogennye geomekhanicheskie polya napryazheniy* [Induced geomechanical stress fields], Novosibirsk, Nauka, 2005, 264 p.

4. Borshch-Komponiets V. I., Makarov A. B. *Gornoe davlenie pri otrabotke moshchnykh pologikh rudnykh zalezhey* [Rock pressure in thick and gently dipping ore mining], Moscow, Nedra, 1986, 271 p.

5. Eremenko V. A., Gakhova L. N., Esina E. N., Zinchenko D. N. Features of geomechanical support in deep-level iron ore mining. *Gornyy zhurnal*. 2014, no 5, pp. 74—78. [In Russ].

6. Kazikaev D. M., Kozyrev A. A., Kaspar'yan E. V., Iofis M. A. *Upravlenie geomekhanicheskimi protsessami pri razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh*: Uchebnoe posobie [Geomechanical control in mineral mining: Teaching aid], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2016, 490 p.

7. Kozyrev A.A., Semenova I.E., Zhuravleva O.G., Panteleev A.V. Hypothesis of strong seismic event origin in Rasvumchorr Mine on January 9, 2018. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018, no 12, pp. 74—83. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83. [In Russ].

8. Zubov V.P. Technologies in application and current challenges of resource saving in underground mining of sheet deposits. *Gornyy zhurnal*. 2018, no 6, pp. 77—83. [In Russ].

9. Sidorov D.V., Ponomarenko T.V., Larichkin F.D., Vorob'ev A.G. Economic justification of innovative solutions on reduction of raw material loss in the aluminium industry in Russia. *Gornyy zhurnal*. 2018, no 6, pp. 65—68. [In Russ].

10. Khazhyylay Ch.V., Eremenko V.A., Kosyreva M.A., Yanbekov A.M. Effect of pore pressure on stress state of rock mass under mining with convergent technologies. *Trudy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii dlya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s elementami nauchnoy shkoly «Gornyatskaya smena–2019»* 24.06—27.06.2019. Novosibirsk, IGD SO RAN, 2019. [In Russ].

11. Khazhyylay Ch.V., Eremenko V.A., Kosyreva M.A., Yanbekov A.M. In-situ rock mass failure envelope plotting using the Hoek–Brown criterion and RocData software toolkit. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018, no 12, pp. 92—101. [In Russ].

12. Koval'chuk M.V., Naraykin O.S., Yatsishina E.B. Converging sciences and technologies—A new stage of technological advance. *Voprosy filosofii*. 2013, no 3, pp. 3—11. [In Russ].

13. Trubetskoy K.N., Myaskov A.V., Galchenko Yu.P., Eremenko V.A. Rationale and creation of convergent technologies for underground mining of thick hard mineral deposits. *Gornyy zhurnal*. 2019, no 5, pp. 6—13. [In Russ].

14. Eremenko V.A., Myaskov A.V., Galchenko Yu.P. Feasibility of creating nature-like technologies for mineral mining. *Materialy X mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Kombinirovannaya geotekhnologiya: perekhod k novomu tekhnologicheskomu ukladu»* 27.05—31.05.2019. Magnitogorsk, RAN, RFFI, IPKON RAN, MGTU im. G.I. Nosova. 2019, pp. 102—109. [In Russ].

15. Lushnikov V.N., Sendi M.P., Eremenko V.A., Kovalenko A.A., Ivanov I.A. Procedure for determining extent of damaged rock zone around stopes by numerical modeling. *Gornyy zhurnal*. 2013, no 12, pp. 11—16. [In Russ].

16. Terzaghi K., Peck R.B. *Soil mechanics in engineering practice*. Wiley. New York. 1967.

17. Jiang Q., Feng X., Song L., Gong Y., Zheg H., Cui J. Modeling rockspecimens through 3D printing: Tentative experiments and prospects. *Acta Mechanica Sinica*. 2015. 32(1). pp. 524—535.

18. Glushikhin F.P., Kuznetsov G.N., Shklyarskiy M.F. *Modelirovanie v geomekhanike* [Modeling in geomechanics], Moscow, Nedra, 1991, 240 p.

19. Eremenko V.A., Myaskov A.V., Galchenko YU.P., Romero Barrenechea Moyses Esau, Lagutin D.V. Substantiation of convergent technology data for the Ilets rock salt mining. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. 2018. Vol. 5, pp. 37—48. [In Russ].

20. Rib S.V., Govorukhin Yu.M. Development of complex method of geomechanical processes study by the means of physical and numerical modeling. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta*. *Nauki o Zemle*. 2018, no 2, pp. 363—378. [In Russ].

21. Basset R.H. The use of physical models in design. *General Report, Proc. VII European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Brighton, U.K. Vol. 5, pp. 253—270.

22. Dunbavan M. *Physical models in geomechanic*s Lect. Series No.53 1982 James cook University. Australia.

23. Vinnikov V.A., Vysotin N.G. Test procedure for finding static elastic modulus of rocks by laser–ultrasonic spectroscopy data. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018, Special edition 1, pp. 90—101. [In Russ].

24. Zou L., Tarasov B.G., Dyskin A.V., Adchikary D.P., Pasternak E., Xu W. Physical Modelling of Stress-dependent Permeability in Fractured Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2013. Vol. 4. pp. 67—81.

25. Baklashov I.V., Kartoziya B.A., SHashenko A.N., Borisov V.N. *Geomekhanika T. 2 Geomekhanicheskie protsessy* [Geomechanics Vol. 2 Geomechanical processes], Moscow, Izd-vo MGGU, 2004, 249 p.

26. Kuz'min Yu.O., Zhukov V.S. *Sovremennaya geodinamika i variatsii fizicheskikh svoystv gornykh porod* [Modern geodynamics and variations in physical properties of rocks], Moscow, Izd-vo MGGU, 2004, 262 p.

27. Kong L., Ostadhassan M., Li C., Tamimi N. Rock Physics and geomechanics of 3D printed Rocks. *ARMA 51st U.S. Rock Mechanics. Geomechanics Symposium*, San Francisco, California, USA, 2017, pp. 1—8.

28. Gell E. M., Walley S. M, Braithwaite C. H. Review of the Validity of the Use of Artificial Specimens for Characterizing the Mechanical Properties of Rocks. *Rock Mechanics and rock Engineering*, 2019, no. 3, pp. 1—13.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Высотин Николай Геннадьевич[1] — ассистент, e-mail: kalgani@yandex.ru,
Косырева Марина Александровна[1] — лаборант, e-mail: marinkosyreva@gmail.com,
Лейзер Владислав Игоревич[1] — студент, e-mail: vlad.leizer@yandex.ru,
Аксенов Захар Владленович[1] — аспирант, e-mail: aksenov.zakhar@yandex.ru,
[1] МГИ НИТУ «МИСиС».
Для контактов: Высотин Н.Г., e-mail: kalgani@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.G. Vysotin[1], Assistant, e-mail: kalgani@yandex.ru,
M.A. Kosyreva[1], Laboratory Assistant, e-mail: marinkosyreva@gmail.com,
V.I. Leyzer[1], Student, e-mail: vlad.leizer@yandex.ru,
Z.V. Aksenov[1], Graduate Student, e-mail: aksenov.zakhar@yandex.ru,
[1] Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: N.G. Vysotin, e-mail: kalgani@yandex.ru.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

(2019, СВ 19, 12 с., DOI: 10.25018/0236-1493-2019-7-19-3-10)

Еремин Георгий Михайлович — канд. техн. наук, горняк, специалист в области разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом.

Приведены результаты новых подходов к оценке влияния эффективности и целесообразности комплекса факторов при вовлечении в разработку новых месторождений апатит-нефелиновых месторождений Северо-Запада России, расположенных на Кольском полуострове. Специфичностью этих месторождений является то, что они по содержанию полезного компонента P_2O_5 относятся к бедным. Кроме того, эти месторождения расположены в заповедных зонах или вблизи них. Рассмотрены основные варианты разработки Партомчоррского месторождения бедных апатитовых руд и других месторождений. Предложен более эффективный комбинированный способ разработки и транспорта руд на обогатительную фабрику.

Ключевые слова: карьер, рудник, камеры, обрушения, транспорт руды, затраты на разработку и транспорт руды, обогатительная фабрика.

FEATURES OF DEVELOPMENT OF FIELDS OF THE NORTH-WEST OF RUSSIA BY THE COMBINED TECHNOLOGY

G.M. Eremin, Cand. Sci. (Eng.), Specialist in the development of mineral deposits by open method, Russia.

The results of new approaches to assessing the impact of efficiency and feasibility of a set of factors in the development of new deposits of Apatite-nepheline deposits in the North-West of Russia, located on the Kola Peninsula. The specificity of these deposits is that they are the content of the useful component of P_2O_5 belong to the poor and not rich. In addition, these deposits are located in protected areas or near them. The main options for the development of the Partomchorr Deposit of poor Apatite ores and other deposits are considered. A more effective combined method of ore development and transport to the concentrator is proposed.

Key words: quarry, mine, chamber, collapse, transportation of ore, the cost to develop and transport ore beneficiation plant.