

УДК 622.83:622.2

## ВЫБОР СПОСОБА СНИЖЕНИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ВЫЕМКИ ЗАПАСОВ ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТОВ ТРУБКИ «МИР»



**В. А. ЗАПРУДИН<sup>1</sup>**,  
младший научный сотрудник



**И. В. ЗЫРЯНОВ<sup>2</sup>**,  
заместитель директора по научной работе, д-р техн. наук,  
zyryanoviv@alrosa.ru



**А. С. КУЛЬМИНСКИЙ<sup>2</sup>**,  
зам. главного инженера  
по подземным горным работам



**А. В. КОТЕНКОВ<sup>1</sup>**,  
зам. начальника отдела  
горной науки

Обоснована возможность возобновления добычных работ на месторождении трубки «Мир». Определены первоочередные мероприятия, изложен концептуальный подход по выработке технических решений в части отработки глубоких горизонтов месторождения с учетом обеспечения безопасных условий труда.

**Ключевые слова:** карьер, безопасная отработка, институт «Якутнипроалмаз», проектирование, горные породы, напряжения.

**DOI:** 10.17580/gzh.2021.02.06

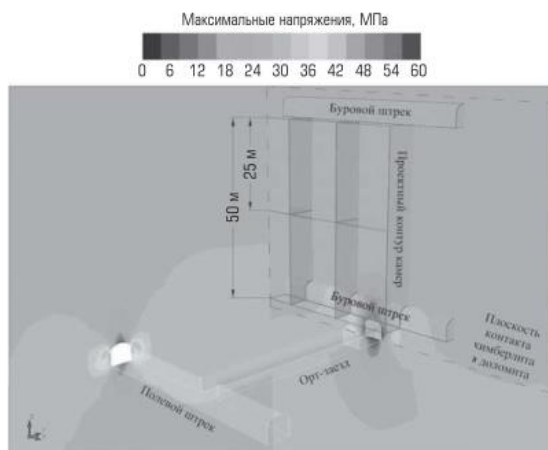
### Введение

В результате размыва вмещающих пород в карьере «Мир» со стороны нижней части южного борта 4 августа 2017 г. произошло неконтролируемое увеличение водопотока из чаши отработанного карьера в выработки подземного рудника «Мир» общим объемом 250 тыс. м<sup>3</sup>. Рабочие горизонты были полностью затоплены. Эксплуатация рудника «Мир» прекращена [1].

В целях поиска технических и технологических решений, которые должны обеспечить дальнейшую безопасную отработку месторождения на всю глубину разведанных запасов с учетом сложившегося состояния горных выработок, был выполнен большой объем работ, состоящий из нескольких этапов.

<sup>1</sup> АО «Уралмеханобр», Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия



**Рис. 1. Поле максимальных напряжений на глубине 1000 м до начала отработки рудных запасов подэтажа**

В институте «Якутнипроалмаз» 12.12.2017 г. проведен внутрифирменный научно-технический семинар АК «АЛРОСА» (ПАО), целью которого являлся обмен мнениями по вариантам возобновления добычных работ на месторождении трубки «Мир». По итогам мероприятия сформирован первоначальный подход компании к разработке концепции возобновления добычных работ на месторождении.

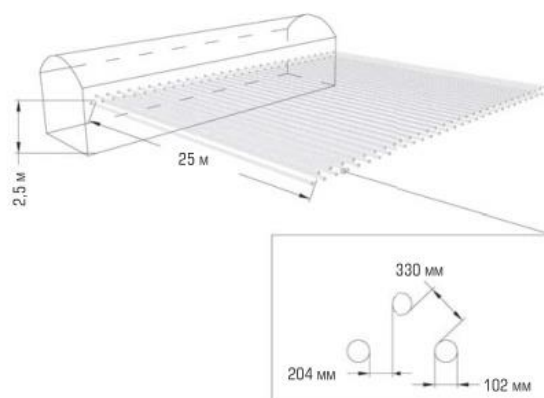
В апреле 2018 г. в Москве в Институте проблем комплексного освоения недр РАН был организован и проведен открытый общероссийский конкурс проектов по возобновлению добычных работ с целью привлечения интеллектуальных ресурсов внешней среды для разработки технических и технологических решений, обеспечивающих возможность отработки месторождения, с участием ведущих ученых нашей страны, специалистов-практиков и зарубежных инжиниринговых организаций, имеющих мировой опыт решения подобных задач: ITASCA Consultants GmbH (Германия), SRK Consulting (Россия), SIGHT POWER (Канада–ЮАР) [2, 3].

По итогам проведенного всестороннего анализа было сформировано первоочередное видение общего концептуального решения по возобновлению добычных работ на месторождении.

**Обоснование возможности возобновления добычных работ на месторождении трубки «Мир»**

На основании полученной информации институтом «Якутнипроалмаз» разработана концепция возобновления добычных работ на месторождении трубки «Мир», в которой выделены пять ключевых этапов.

1. Строительство нового рудника «Мир» для отработки глубоких горизонтов.
2. Отработка запасов глубоких горизонтов в восходящем порядке (отм. –565/–1300 м).
3. Реконструкция бортов карьера до отм. –130 м, сооружение карьерного водоотлива, откачка рассолов из подземных затопленных выработок.



**Рис. 2. Схема бурения разгрузочных скважин**

4. Отработка подземным способом запасов предохранительного целика и ранее затопленных горизонтов (отм. –310/–565 м).
5. Отработка карьером запасов в отм. –140/–230 м.

Предложенная концепция позволит стабильно осуществлять добычные работы на месторождении трубки «Мир» до 2066 г. Каждый этап предложенной концепции требует разработки отдельных технических решений.

Помимо разработанной концепции, институтом «Якутнипроалмаз» выполнено предварительное технико-экономическое обоснование отработки запасов глубоких горизонтов трубки «Мир» в отм. –565/–1300 м.

В 2019 г. компания «АЛРОСА» приступила к выполнению геологоразведочных работ и предпроектных проработок для отработки запасов в интервале отметок –565/–1300 м с целью разработки оптимальных технических решений для полноценной и безопасной отработки части запасов трубки «Мир».

В соответствии с разработанной концепцией, институт «Якутнипроалмаз» осуществляет разработку технологического регламента на проектирование вскрытия и отработки глубоких горизонтов месторождения с целью обоснования схемы вскрытия, определения объемов горно-капитальных работ, выбора системы разработки [4]. Выполняются научно-исследовательские работы по обоснованию технических и технологических решений по реконструкции бортов карьера до отм. –140 м для сооружения открытого карьерного водоотлива с целью обеспечения водоотведения рассолов метегеро-ичерского водоносного комплекса от месторождения, ликвидации постоянного водопритока в рудник и обеспечения безопасных условий для ведения работ подземным способом.

В IV квартале 2021 г. планируется закончить геологоразведочные работы, по результатам которых будет доработан регламент и выполнено ТЭО инвестиций в баланс предприятия.

В ходе поиска решений по отработке глубоких запасов трубки «Мир» (свыше 1500 м) установлено, что природное напряженное состояние массива горных пород на месторождении трубки «Мир» является гравитационным и на глубоких горизонтах характеризуется преобладанием максимальной (вертикальной) составляющей

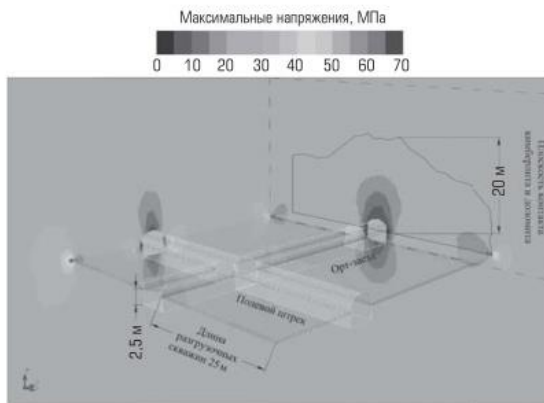


Рис. 3. Зоны влияния сети разгрузочных скважин

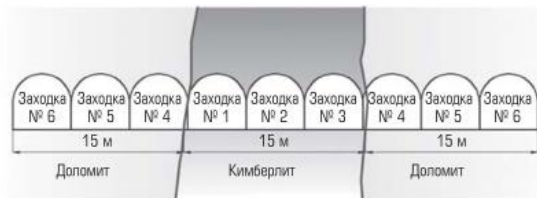


Рис. 4. Разгрузка массива путем формирования группы слоевых заездов

поля напряжений над прочностными параметрами руды (среднее значение прочности на сжатие кимберлита составляет 18 МПа) [5–7]. На глубине 1000 м она уже достигает порядка 28 МПа (рис. 1). Ранее при разработке подземных рудников компания не сталкивалась с такими проблемами, да и не приходилось работать на таких глубинах.

Ведение добычных работ в таких условиях возможно только после предварительной разгрузки массива горных пород. Поэтому задача состояла в обосновании такого способа и параметров разгрузочных мероприятий, которые обеспечили бы безопасное ведение горных работ и при этом были экономически эффективны.

В ненарушенном массиве горных пород всегда наблюдается поле напряжений благодаря действию тектонических и гравитационных сил [8–13]. Создание обнажения в массиве горных пород сопровождается сокращением площади действия этих сил, в результате чего возникает чередование зон концентрации и разгрузки напряжений. Поэтому схема процесса снижения напряжений в массиве горных пород заключается в создании обнаженного пространства такой формы, чтобы зона разгрузки напряжений вокруг его контура распространялась на необходимое расстояние (проектную высоту очистных камер), а зона концентрации не оказывала бы значительного влияния на подготовительные и капитальные выработки, расположенные вблизи фронта горных работ.

Для решения этой задачи в программе RS3 компании Rocscience [14–16] построены математические модели способов разгрузки массива горных пород:

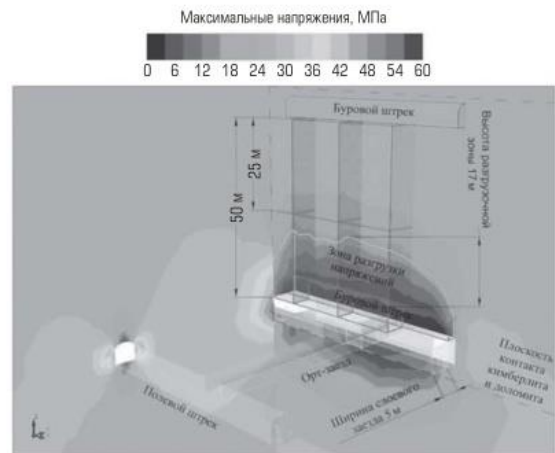


Рис. 5. Поле максимальных напряжений после формирования «разрезного слоя» в кимберлите

- сетью разгрузочных скважин;
- формированием разрезных слоев с различными параметрами, создаваемых на глубине 1000 м и более.

Способ разгрузки напряжений в массиве горных пород бурением нескольких рядов сближенных скважин (рис. 2) основан на естественном разрушении слоя породы, находящегося между рядами скважин, с целью снижения его модуля упругости из-за образования трещин [17].

Модуль упругости горной породы характеризует ее способность деформироваться при приложении к ней силы. В результате смещения массива горных пород зоны концентрации напряжений перемещаются на краевые части площади разбуривания.

Математическое моделирование разгрузки массива горных пород бурением разгрузочных скважин показывает, что максимальная составляющая природного поля напряжений, имеющая значение 28 МПа на глубине 1000 м, снижается до 25 МПа на расстоянии около 20 м выше сети скважин (рис. 3). Таким образом, создание разгрузочных скважин служит, скорее, локальным способом разгрузки напряжений в массиве горных пород, который не способен создать безопасные условия для работы в пределах горизонта (подэтажа).

Следующая группа способов разгрузки массивов руды и породы основана на формировании зоны разгрузки путем проходки и последующей закладки группы слоевых заездов. Такая группа горных выработок представляет собой так называемый разрезной слой (рис. 4).

Основным параметром разгрузочного слоя для создания пониженных напряжений, обеспечивающих необходимые размеры зоны разгрузки, является его ширина в массиве вмещающих пород. Чем меньше его ширина, тем меньше безопасное расстояние для ведения горных работ, а также время для проходки слоевых заездов. Чем больше ширина «разрезного слоя», тем на большее расстояние распространяется безопасная зона для ведения горных работ, но также возрастают время и затраты на формирование такого



**Рис. 6. Поле максимальных напряжений после формирования «разрезного слоя» во вмещающих породах на 15 м по обе стороны от рудного тела и проходки буровых штреков**

слоя. С целью определения необходимой ширины «разрезного слоя» создана математическая модель с различными стадиями его формирования. Для начала необходимо рассмотреть распределение поля максимальных напряжений после проходки полевого штрека и ортов-завездов вблизи проектного контура очистных камер (см. рис. 1). Значение максимальной составляющей поля напряжений составляет около 28 МПа.

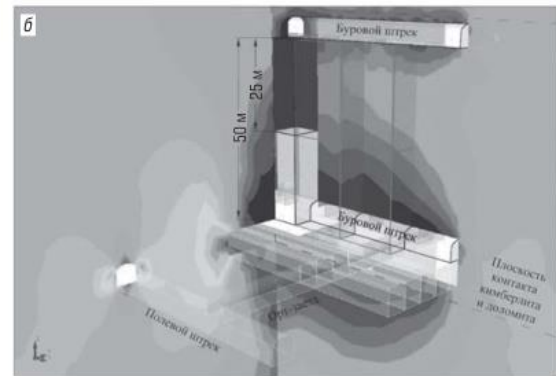
В результате формирования «разрезного слоя» на ширину рудного тела (в среднем 15 м) происходит снижение напряжений в рудном массиве на высоту около 17 м (в этой зоне напряжения снижены до предела прочности кимберлита на сжатие 18 МПа) (рис. 5). Данный характер распределения поля максимальных напряжений в массиве не позволяет безопасно вести горные работы в верхней камере, четко прослеживается зона концентрации напряжений вблизи почвы нижней камеры у контакта рудного тела и вмещающих пород (доломита).

Формирование слоевых завездов как в кимберлитовой руде, так и во вмещающих породах по обе стороны от рудного тела на расстояние 15 м (см. рис. 4) обеспечивает снижение максимальных напряжений до 10–15 МПа на высоту подэтажа (рис. 6).

Дальнейшие стадии ведения горных работ на рассматриваемом участке (рис. 7) показывают, что в результате создания «разрезного слоя» с выходом во вмещающие породы на 15 м в обе стороны от контакта руда–порода в подэтаже не формируются зоны высоких концентраций максимальных напряжений не только в рудном массиве будущих смежных камер, но и вблизи контакта рудного тела и вмещающих пород.

#### Заключение

Составленная математическая модель процесса разгрузки рудного массива и вмещающих пород показала, что наиболее эффективным и безопасным способом разгрузки в условиях



**Рис. 7. Поле максимальных напряжений после отработки верхней (а) и нижней (б) камеры**

глубоких горизонтов рудника «Мир» является создание «разрезного слоя» как в руде, так и во вмещающих породах по обе стороны от рудного тела на расстояние 15 м. Разгрузочные мероприятия позволят безопасно вести горные работы по отработке рудных запасов подэтажами высотой до 50 м.

Данное решение предложено к реализации регламентом для дальнейшего проектирования [4]. Проведение предложенных разгрузочных мероприятий позволит увеличить параметры выемочных камер, сократить объемы подготовительно-нарезных работ (ПНР), применить облегченные виды крепления подготовительно-нарезных выработок (анкерное крепление с сеткой и набрызг-бетоном) в разгруженной зоне, снизить затраты на выполнение ПНР и тем самым нивелировать расходы на создание разгрузочных слоев. Безусловно, ведение работ по формированию разгрузочных слоев на начальном этапе существенно затормозит темпы развития рудника, что скажется на экономических показателях работы, но в дальнейшем позволит применять наиболее эффективные и безопасные как с технологической, так и с экономической точки зрения системы и, как следствие, обеспечит проекту большую финансовую привлекательность.

**Библиографический список**

1. Рудник «Мир»: технический проект консервации рудника. – ОАО «Якутнипроалмаз», 2018.
2. Проблемы и пути эффективной отработки алмазоносных месторождений: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: Наука, 2011. – 584 с.
3. Опыт и практические шаги по восстановлению горнодобывающего предприятия после аварии: сб. ст. Всероссийской конф. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 135 с.
4. Технологический регламент на проектирование вскрытия и отработки запасов глубоких горизонтов подземного рудника «Мир». Этап II: Обоснование систем разработки с закладкой выработанного пространства. – Мирный: ОАО «Якутнипроалмаз», 2020.
5. Работа №753-10/10. Определить физическо-механические и деформационные свойства вмещающих пород и кимберлитовой руды трубки «Мир» в отметках –210–310 м. – Мирный: ОАО «Якутнипроалмаз», 2010.
6. Константинова С. А., Крамсков Н. П., Соловьев В. А. Некоторые проблемы механики горных пород применительно к отработке алмазных месторождений Якутии. – Новосибирск: Наука, 2011. – 222 с.
7. Колганов В. Ф., Акишев А. Н. Коренные месторождения алмазов Западной Якутии: справочное пособие. – Новосибирск: Гео, 2011. – 212 с.
8. Баклашов И. В. Геомеханика: учебник: в 2 т. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 455 с.
9. Nikolaev M. V., Grigorieva E. E., Gulyaev P. V. Assessment of risks influencing innovation activity of industrial enterprises (on example of diamond-brilliant complex) // Eurasian Mining. 2016. No. 2. P. 6–10. DOI: 10.17580/em.2016.02.02
10. Зельберг А. С., Зырянов И. В., Бондаренко И. Ф. Современные и перспективные технологии при разработке месторождений алмазов // Горная промышленность. 2019. № 3. С. 26–31.
11. Ping Zhang, Ering Nordlund, Graham Swan, Changping Yi. Velocity Amplification of Seismic Waves Through Parallel Fractures Near a Free Surface in Fractured Rock: A Theoretical Study // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019. Vol. 52. Iss. 1. P. 199–213.
12. Sheng Zeng, Shaoping Wang, Bing Sun, Qibing Liu. Propagation Characteristics of Blasting Stress Waves in Layered and Jointed Rock Caverns // Geotechnical and Geological Engineering. 2018. Vol. 36. Iss. 3. P. 1559–1573.
13. Рыльникова М. В., Зотеев О. В. Геомеханика: учеб. пособие. – М.: ИД «Руда и Металлы», 2003. – 240 с.
14. Shiguo Sun, Weichen Guo, Yujuan Zhang, Junlei Wu, Weidong Liu. Research on the Laws of the Overlying Rock Mass Deformation of Combined Open-Pit with Underground Mining // Proceedings of the 2015 International Symposium on Energy Science and Chemical Engineering. Ser.: Advances in Engineering Research. – Amsterdam: Atlantis Press, 2015. Vol. 45. P. 68–72.
15. Sarder M. Yahya, Rini A. Abdullah, Mohd Ashraf Mohamad Ismail, Hisham Mohamad, Muhammad Azril Hezmi, Siti Norafida Jusoh. 3D numerical modelling of shallow tunnel in weathered granite incorporating multi-stage excavation and pre-support // Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering). 2016. Vol. 78. No. 8-6. P. 39–44.
16. Vallejos J. A., Delonca A., Peres E. Three-dimensional effect of stresses in open stope mine design // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2018. Vol. 32. No. 5. P. 355–374.
17. Типовые схемы приведения в неудороопасное состояние участков горного массива и технологических циклов скважинами большого диаметра. – Л.: ВНИМИ, 1991. – 39 с. 

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 2, pp. 53–57  
DOI: 10.17580/gzh.2021.02.06

**Selection of a strata pressure reduction method to extract deeper level reserves of Mir pipe**

**Information about authors**

- V. A. Zaprudin<sup>1</sup>, Junior Researcher  
 I. V. Zyryanov<sup>2</sup>, Deputy Director of Science, Doctor of Engineering Sciences, zyryanoviv@alrosa.ru  
 A. S. Kulminskiy<sup>2</sup>, Deputy Chief Engineer in Underground Mining  
 A. V. Kotenkov<sup>1</sup>, Deputy Head of Mining Science Department

<sup>1</sup>Uralmekhanobr, Yekaterinburg, Russia  
<sup>2</sup>Yakutniiproalmaz Institute, ALROSA, Mirny, Russia

**Abstract**

The article presents the chronology and stages of mining resumption at Mir pipe. The initiatory steps of the conceptual approach to underground mining of ore reserves at the depth greater than 1500 m are described. The primary measures on catchment of highly mineralized water from Metegero-lchersky aquifer are identified. The exploratory study results on deeper level mining safety in the future underground mine in terms of the strata pressure reduction are given. The authors in detail discuss two methods of rock mass destressing: destressing drilling and formation of protection layers with different parameters at the depths of 1000 m and greater. Natural stress state of rock mass is modeled in Rocscience RS3 environment. The analyses of the mathematical models of ore and enclosing rock destressing show that the safest and the most effective methods of destressing of deeper level rock mass in Mir Mine is creation of a protective separation layer both in ore body and in enclosing rock mass on the both sides of the ore body at a distance of 15 m. Such destressing measures can allow safe mining of ore reserves using the sublevel stoping method with sublevels to 50 m high. The research findings will be used in the front-end engineering as the basis for the further mine planning and design.  
**Keywords:** open pit mine, safe mining, Yakutniiproalmaz Institute, mine planning and design, rocks, stresses.

**References**

1. Mir Mine: Detailed design of mine suspension. Yakutniiproalmaz, 2018.
2. Problems and ways of the efficient processing of diamondiferous deposits: collection of reports of International Scientific and Practical Conference. Novosibirsk: Nauka, 2011. 584 p.

3. Experience and practical measures on recovery of a mine after an accident: All-Russian Conference Proceedings. Moscow: MGTU im. N. E. Bauman, 2018. 135 p.
4. Design procedures for accessing and mining of deeper levels in Mir Mine. Stage II: Justification of mining systems with backfilling. Mirny: Yakutniiproalmaz, 2020.
5. Paper No. 753-10/10. Determination of physical, mechanical and deformation properties of enclosing rock mass and kimberlite ore of Mir pipe at level –210–310 m. Mirny: Yakutniiproalmaz, 2010.
6. Konstantinova S. A., Kramskov N. P., Solovov V. A. Some problems of rocks mechanics as applied to processing of Yakutian diamond deposits. Novosibirsk: Nauka, 2011. 222 p.
7. Kolganov V. F., Akishev A. N. Primary deposits of Western Yakutia diamonds: tutorial. Novosibirsk: Geo, 2011. 212 p.
8. Baklashov I. V. Geomechanics: tutorial: in two volumes. Moscow: Izdatelstvo MGGU, 2004. 455 p.
9. Nikolaev M. V., Grigorieva E. E., Gulyaev P. V. Assessment of risks influencing innovation activity of industrial enterprises (on example of diamond-brilliant complex). Eurasian Mining. 2016. No. 2. pp. 6–10. DOI: 10.17580/em.2016.02.02
10. Zelberg A. S., Zyryanov I. V., Bondarenko I. F. Current and emerging technologies in development of diamond deposits. Gornaya promyshlennost. 2019. No. 3. pp. 26–31.
11. Ping Zhang, Ering Nordlund, Graham Swan, Changping Yi. Velocity Amplification of Seismic Waves Through Parallel Fractures Near a Free Surface in Fractured Rock: A Theoretical Study. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019. Vol. 52, Iss. 1. pp. 199–213.
12. Sheng Zeng, Shaoping Wang, Bing Sun, Qibing Liu. Propagation Characteristics of Blasting Stress Waves in Layered and Jointed Rock Caverns. Geotechnical and Geological Engineering. 2018. Vol. 36, Iss. 3. pp. 1559–1573.
13. Rylnikova M. V., Zoteev O. V. Geomechanics: Educational aid. Moscow: Ore and Metals Publishing House, 2003. 240 p.
14. Shiguo Sun, Weichen Guo, Yujuan Zhang, Junlei Wu, Weidong Liu. Research on the Laws of the Overlying Rock Mass Deformation of Combined Open-Pit with Underground Mining. Proceedings of the 2015 International Symposium on Energy Science and Chemical Engineering. Ser.: Advances in Engineering Research. Amsterdam: Atlantis Press, 2015. Vol. 45. pp. 68–72.
15. Sarder M. Yahya, Rini A. Abdullah, Mohd Ashraf Mohamad Ismail, Hisham Mohamad, Muhammad Azril Hezmi, Siti Norafida Jusoh. 3D numerical modelling of shallow tunnel in weathered granite incorporating multi-stage excavation and pre-support. Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering). 2016. Vol. 78, No. 8-6. pp. 39–44.
16. Vallejos J. A., Delonca A., Peres E. Three-dimensional effect of stresses in open stope mine design. International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2018. Vol. 32, No. 5. pp. 355–374.
17. Standard flowcharts for hazard safety of rock mass and pillars by large diameter drilling. Leningrad: VNIMI, 1991. 39 p.