

УДК 622.272:622.235

**Антипин Юрий Георгиевич**

кандидат технических наук,  
заведующий лабораторией подземной геотехнологии,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [geotech@igduran.ru](mailto:geotech@igduran.ru)

**Рожков Артём Андреевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
лаборатории подземной геотехнологии,  
Институт горного дела УрО РАН,  
e-mail: [69artem@bk.ru](mailto:69artem@bk.ru)

**Смирнов Алексей Алексеевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
лаборатории подземной геотехнологии,  
Институт горного дела УрО РАН,  
e-mail: [geotech910@yandex.ru](mailto:geotech910@yandex.ru)

**Барановский Кирилл Васильевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
лаборатории подземной геотехнологии,  
Институт горного дела УрО РАН,  
e-mail: [kartingist@list.ru](mailto:kartingist@list.ru)

**Соломенн Юрий Михайлович**

научный сотрудник  
лаборатории подземной геотехнологии,  
Институт горного дела УрО РАН,  
e-mail: [yuriysolo@mail.ru](mailto:yuriysolo@mail.ru)

**АСПЕКТЫ БЕЗОПАСНОГО ПРОВЕДЕНИЯ  
МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ ПРИ ОБРУШЕНИИ  
ЦЕЛИКОВ В УСЛОВИЯХ ПОДЗЕМНЫХ  
РУДНИКОВ КРИОЛИТОЗОНЫ\****Аннотация:*

Для условий подземной разработки месторождений в криолитозоне рассмотрен весьма актуальный вопрос, связанный с обеспечением безопасности работников и сохранностью оборудования, – определение границ опасной зоны по критерию действия ударной воздушной волны при массовом обрушении целиков различного назначения в условиях постоянных отрицательных температур в горных выработках. С учетом опыта освоения запасов аналогичных месторождений севера Российской Федерации и дальнего зарубежья определены характерные горнотехнические условия проведения массовых взрывов – традиционный порядок освоения запасов рудных тел и параметры конструктивных элементов камерных систем разработки на момент выемки основных запасов блоков. На характерном примере массового обрушения междуэтажного и междукammerного целика в условиях рудника «Ветренский» установлена зависимость избыточного давления на фронте ударной воздушной волны от расстояния от места проведения массового взрыва. С учетом условий ведения добычных работ в криолитозоне, отсутствия крепления горных выработок, особенностей распространения ударной воздушной волны при отрицательных темпе-

DOI: 10.25635/2313-1586.2022.03.033

**Antipin Yuri G.**

Candidate of Technical Sciences,  
Head of Laboratory of underground geotechnology,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [geotech@igduran.ru](mailto:geotech@igduran.ru)

**Rozhkov Artem A.**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher,  
Laboratory of underground geotechnology,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [69artem@bk.ru](mailto:69artem@bk.ru)

**Smirnov Alexey A.**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher,  
Laboratory of underground geotechnology,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [geotech910@yandex.ru](mailto:geotech910@yandex.ru)

**Baranovsky Kirill V.**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher,  
Laboratory of underground geotechnology,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [kartingist@list.ru](mailto:kartingist@list.ru)

**Solomein Yuri M.**

Researcher,  
Laboratory of underground geotechnology,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [yuriysolo@mail.ru](mailto:yuriysolo@mail.ru)

**ASPECTS OF SAFE CONDUCTION OF MASS EX-  
PLOSIONS DURING PILLARS CAVING IN THE  
CONDITIONS OF UNDERGROUND MINES IN  
THE PERMAFROST ZONE***Abstract:*

For the conditions of underground mining in the permafrost zone, the paper considers the very topical issue related to ensuring the safety of workers and the safety of equipment – definition of the boundaries of the danger zone according to the criterion of the action of a shock air wave during the mass caving of pillars for various purposes under conditions of constant low temperatures in mine workings. Taking into account the experience of mining reserves of similar deposits in the north of the Russian Federation and far abroad, it determines the characteristic mining and technical conditions for conducting mass explosions – the traditional exploration order of ore body reserves and the parameters of structural elements of chamber mining systems at the time of extraction of the main reserves of blocks. Based on a typical example of mass caving of interfloor and rib pillars in the conditions of the Vetrensky mine, we established the dependence of excess pressure at the front of a shock air wave on the distance from the place of the mass explosion. Taking into account the conditions for conducting mining operations in the permafrost zone, the absence of mine workings support and the features of the propagation of a shock air wave at low temperatures, the authors propose to take into account, when determining the over pressure at the front

\* Работа выполнена в рамках Госзадания № 075-00412-22 ПР, тема 1 (2022-2024), (FUWE-2022-0005), рег. № 1021062010531-8-1.5.1

*ратурах предложено учитывать при определении избыточного давления на фронте УВВ его двукратное увеличение при определении размеров опасной зоны по данному фактору.*

*Ключевые слова: подземный рудник, криолитозона, целик, массовый взрыв, опасная зона, безопасность, ударная воздушная волна, избыточное давление, местные сопротивления.*

*of a shock air wave, its two-fold increase in determining the size of the danger zone for this factor.*

*Key words: underground mine, permafrost zone, pillar, mass explosion, danger zone, safety, air shock wave, over-pressure, local resistances.*

### *Введение*

Золоторудное месторождение Ветренское расположено в пределах восточной окраины Верхне-Колымского нагорья, на водоразделе р. Колымы и ее правого притока р. Обо, непосредственно к востоку от Колымского водохранилища. Рельеф района месторождения среднегорный, сильно расчлененный, характеризуется наличием узких водораздельных гребней, крутых склонов, врезанных V-образных долин ручьев и распадков. Климат района резко континентальный, характеризующийся продолжительной суровой зимой и коротким, сравнительно теплым летом. Территория расположена в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (криолитозоне). Месторождение представлено сериями сближенных ветвящихся рудоносных жил, прожилков, линз и кварцевых тел, залегающих в сланцах и милонитах.

Поскольку месторождение расположено в гористой местности, вскрытие шахтного поля осуществлено несколькими штольневými горизонтами. Рудные тела, до настоящего времени находившиеся в отработке, залежали выше горизонта рудовыдачной штольни № 11, пройденной в основании горы. В связи с истощением сырьевой базы предприятия были проведены геологоразведочные работы ниже горизонта штольни № 11, показавшие наличие значительного количества рудных тел на нижележащих горизонтах. Было принято решение о необходимости их отработки, в том числе разведочные работы показали наличие запасов в рудном теле № XXIII ниже отметки горизонта штольни № 11. Верхняя часть данного рудного тела наклонного падения ( $35 - 45^\circ$ ) мощностью до 6 – 7 м ранее была отработана до отметки горизонта штольни № 11 системой подэтажного обрушения. Ниже горно-геологические условия залегания значительно изменились – средняя мощность и угол падения составили порядка 4 м и  $70^\circ$ , соответственно. При этом его протяженность в данных отметках превышает высоту этажа (50 - 60 м) [1]. В данных условиях с учетом прогноза распространения запасов данного рудного тела целесообразно перейти на его отработку системой подэтажных штреков [2 - 7]. Для осуществления данного перехода с целью формирования открытого очистного пространства и предотвращения затекания обрушенных пород вышележащего блока будет необходимо сформировать междуэтажный (МЭЦ) и междукамерный или междублоковый (МКЦ или МБЦ) целики.

Таким образом, для условий разработки Ветренского месторождения необходимо определить безопасные параметры дальнейшего массового обрушения данных целиков с целью выемки временно неактивных запасов, что является актуальной научно-технической задачей.

### *Горнотехнические условия проведения массового взрыва при обрушении целиков*

В соответствии со сложившимися горно-геологическими и горнотехническими условиями рудное тело № XXIII в отметках ниже горизонта штольни № 11 следует обрабатывать системой подэтажных штреков с обязательным формированием МЭЦ и МКЦ (МБЦ). При подтверждении новых запасов на фланге данного рудного тела сформированный целик будет выполнять роль МКЦ. Отработка МКЦ будет осуществлена совместно с запасами МЭЦ после выемки запасов второй камеры на фланге рудного тела. Если фланговые запасы не подтвердятся или будут незначительными, сформированный

целик будет выполнять роль МБЦ. Тогда с присоединенными незначительными фланговыми запасами при их наличии или без них такой МБЦ подлежит отработке путем массового обрушения одновременно с запасами МЭЦ и площадного выпуска руды через днище камеры в основании блока.

В процессе отработки верхнего подэтажа над камерой оформляется МЭЦ с необходимыми параметрами [8 – 10]. Отставание очистного забоя нижнего подэтажа по отношению к верхнему должно составлять не менее трех ЛНС. Отбойку руды производят веерами восходящих скважинных зарядов диаметром 65 мм секциями по 2 - 4 веера. Основная часть руды выпускается через траншейное днище в основании блока из погрузочных заездов с помощью погрузо-доставочных машин (ПДМ).

После выемки основных запасов камеры производится массовое обрушение целиков [11]. Для обрушения МЭЦ проходится подэтажный полевой штрек с буровыми камерами по флангам. Из буровых камер производится бурение наклонных вееров скважин. Запасы МКЦ (МБЦ) разбуриваются аналогично камерным – веерами восходящих скважин (рис. 1).

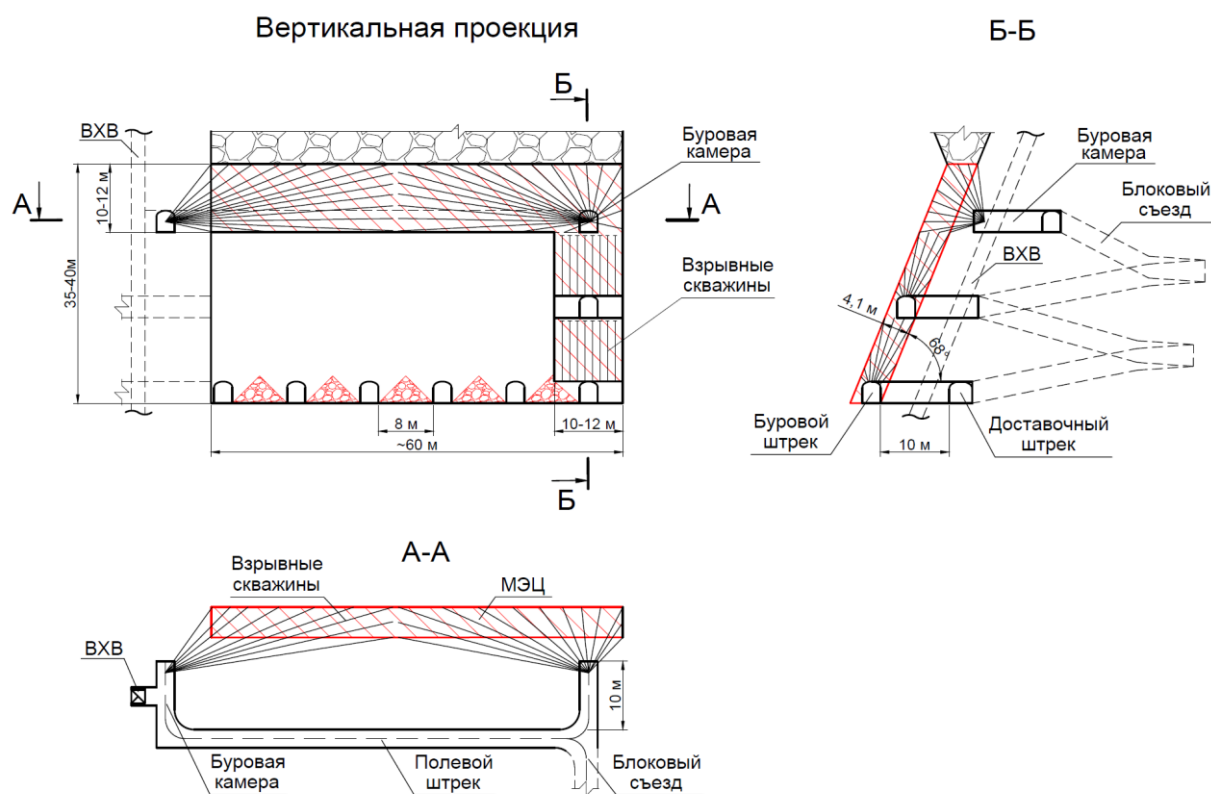


Рис. 1. Схема обрушения МЭЦ и МКЦ после отработки основных запасов блока

Выпуск руды обрушенных целиков производится из погрузочных заездов днища камеры под обрушенными породами.

Общий порядок отработки месторождения в вертикальной плоскости характерен для большинства месторождений аналогов – нисходящий, в горизонтальной – от висячего бока к лежащему [12 – 15]. Рудное тело № XXIII расположено в наибольшем удалении от висячего бока и на нижней высотной отметке среди всех прочих рудных тел. Следовательно, его отработка будет производиться в последнюю очередь на данном этапе освоения месторождения. Окончание проходческих работ при вскрытии следующего этажа и подготовительно-нарезных работах будет произведено параллельно с выпуском запасов МЭЦ и МКЦ рудного тела № XXIII.

### Определение параметров безопасности при массовом обрушении целиков

Поскольку при обработке Ветренского месторождения до настоящего времени не было опыта массового обрушения МЭЦ и МКЦ, необходимо обосновать безопасные условия проведения данной технологической операции. Основным поражающим фактором для людей является воздействие ударной воздушной волны (УВВ). В соответствии с действующими Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения» (ФНиП № 494) и «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» (ФНиП № 505), для определения безопасных расстояний по воздействию УВВ, исключая травмирование людей при производстве взрывных работ в подземных горных выработках, необходимо определить значение избыточного давления на фронте УВВ.

Массовый взрыв МЭЦ и МКЦ будет проведен в непосредственной близости от горизонта штольни № 11. Суммарный объем обрушаемых целиков составляет 4410 м<sup>3</sup> (МЭЦ – 3180 м<sup>3</sup>, МКЦ – 1230 м<sup>3</sup>). Удельный расход ВВ принимается согласно действующим «Нормам технологического проектирования ВНТП-13-2-93» по крепости руды ( $f=12-14$ ) и выходу негабарита (до 10 %) при размере кондиционного куска  $c=400$  мм –  $q_{\text{ВВ}}=1,5$  кг/м<sup>3</sup>. При определении границ опасных зон действия УВВ на людей принимается вся масса взрываемого ВВ вне зависимости от используемых замедлений между зарядами. Таким образом, расчет будет производиться для массы ВВ  $Q=6615$  кг.

Избыточное давление на фронте УВВ для пород следует рассчитывать по формулам [16, 17]:

$$\Delta P = \left( 3410 \frac{Q_3}{R \Sigma S} + 794 \sqrt{\frac{Q_3}{R \Sigma S}} \right) e^{-\frac{\beta R}{d}}, \text{ кПа}, \quad (1)$$

$$Q_3 = Q \times Q_3, \text{ кг}, \quad (2)$$

$$Q_3 = 12 P d_{\text{СКВ}} K_3 N, \text{ кг}, \quad (3)$$

где  $\Delta P$  – избыточное давление на фронте УВВ, кПа;  $Q_3$  – масса одновременно взорванного эквивалентного заряда, кг;  $Q$  – масса одновременно взрываемого заряда, кг;  $Q_3$  – коэффициент эквивалентности;  $d_{\text{СКВ}}$  – диаметр скважин, м;  $K_3$  – коэффициент, значение которого зависит от отношения длины свободной от заряда части скважины к ее диаметру;  $P$  – вместимость взрывчатых веществ 1 м скважины, кг;  $R$  – расстояние, пройденное УВВ от заряда до расчетной точки, м;  $\Sigma S$  – суммарная площадь поперечного сечения выработок, примыкающих к заряду ВВ, для которых производится расчет давления в УВВ, м<sup>2</sup>;  $e$  – основание натурального логарифма,  $e=2,71$ ;  $d$  – приведенный диаметр выработки,  $d = 1,12 \times S^{0,5}$ , м;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности выработок.

Поскольку выработок, по которым распространяется УВВ, может быть несколько и они переменного сечения, их приведенный диаметр должен быть определен по формуле

$$d = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{n}, \text{ м}, \quad (4)$$

где  $d_1, d_2, d_n$  – приведенные диаметры соответствующих выработок, м;  $n$  – количество выработок.

Расчетные значения  $\Delta P$  для направления распространения УВВ от места взрыва к устью штольни № 11 с учетом местных сопротивлений (разведочные штреки № 1 и 2 с коэффициентами  $\delta=1,25$  каждый, транспортный уклон с коэффициентом  $\delta=1,2$ ) в зависимости от пройденного расстояния приведены на рис. 2. Предельно допустимое избыточное давление на фронте УВВ для людей следует принимать 10 кПа.

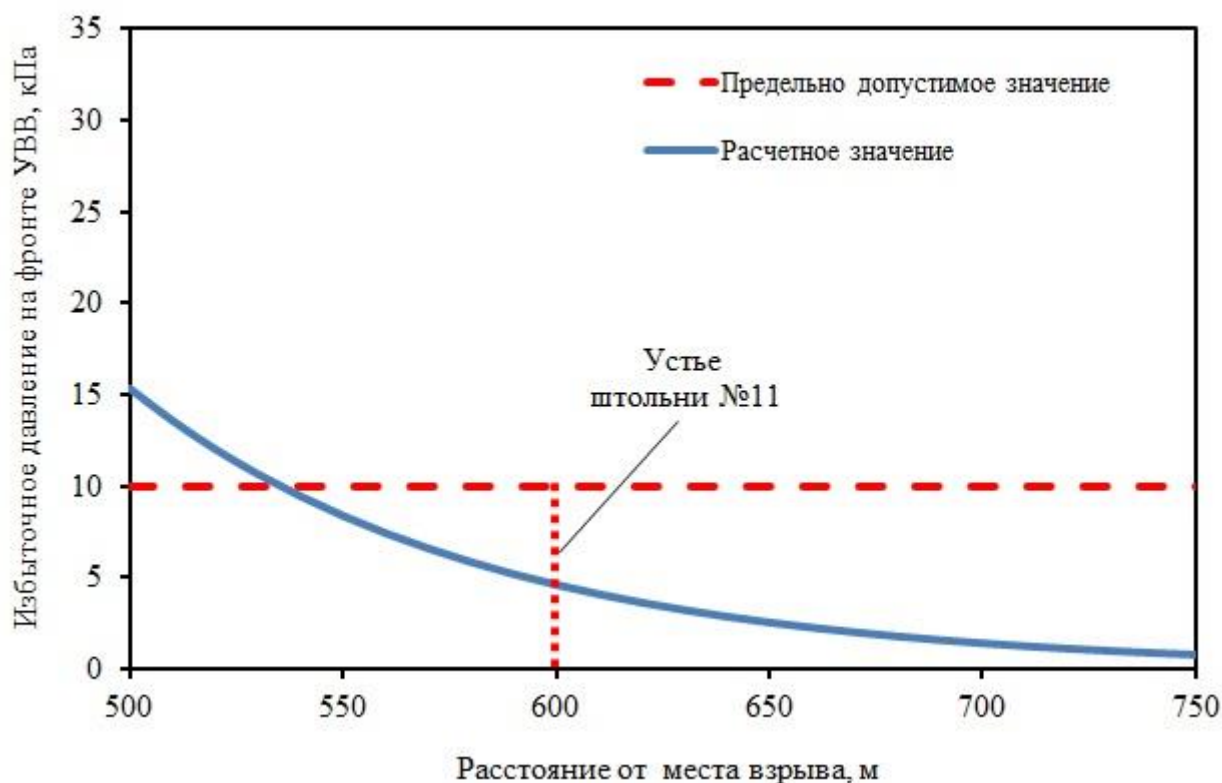


Рис. 2. Зависимость избыточного давления на фронте УВВ от расстояния от места взрыва

Устье штольни № 11 находится на расстоянии 600 м от рудного тела № XXIII. Из полученного графика видно, что на таком расстоянии значение  $\Delta P$  не превышает предельно допустимого для людей значения.

Однако при определении значения  $\Delta P$  следует учитывать, что разработка месторождения проводится в условиях криолитозоны. Известно, что с целью предотвращения растепления массива и снижения его устойчивости в горных выработках рудников, находящихся в криолитозоне, постоянно поддерживается отрицательная температура воздуха [18, 19]. Для условий открытых горных работ рядом исследователей установлено, что при отрицательной температуре воздуха величины избыточного давления  $\Delta P$  в 1,5 – 2 раза больше, чем при положительной температуре [20 – 22]. По аналогии с открытыми работами и учитывая, что при подземной разработке температура и направление воздухопотоков стабильны, фактор увеличения избыточного давления  $\Delta P$  учитывается при помощи введения в уравнение (1) соответствующего коэффициента

$$\Delta P = \left[ \left( 3410 \frac{Q_3}{R \Sigma S} + 794 \sqrt{\frac{Q_3}{R \Sigma S}} \right) e^{-\frac{\beta R}{d}} \right] \frac{k_{кз}}{\delta}, \text{ кПа}, \quad (5)$$

где  $k_{кз}$  – коэффициент, учитывающий постоянные отрицательные температуры воздуха в горных выработках рудников криолитозоны,  $k_{кз}=1,5 - 2$ ,  $\delta$  – коэффициент, учитывающий местные сопротивления.

Принимая во внимание попутное движению УВВ направление воздухопотока [23], поскольку штольня № 11 является воздуховыдачной, для рассматриваемых условий значение коэффициента принимается максимальным  $k_{кз}=2$ . Результаты расчета представлены на рис. 3.

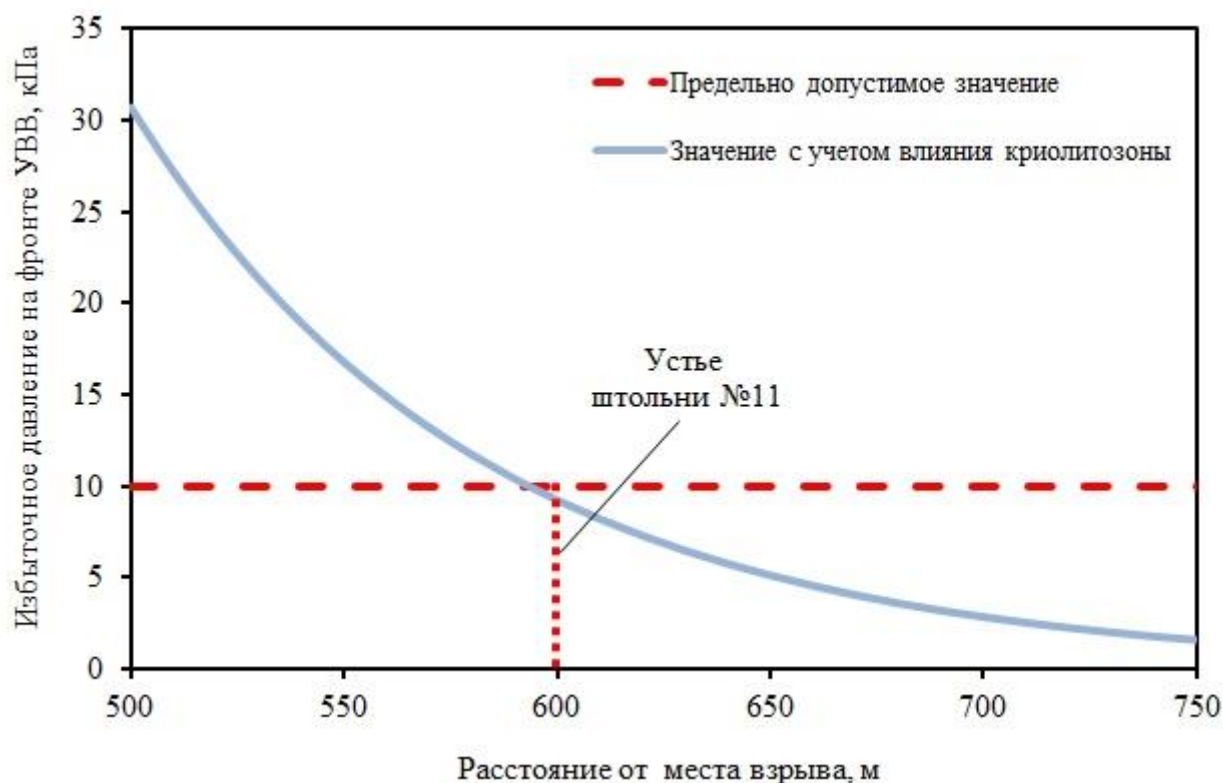


Рис. 3. Зависимость избыточного давления на фронте УВВ от расстояния от места взрыва с учетом влияния постоянных отрицательных температур в горных выработках рудника, расположенного в криолитозоне

Из полученного графика видно, что на таком расстоянии расположения устья штольни № 11 от места взрыва значение  $\Delta P$  не превышает предельно допустимого для людей. Тем не менее из соображений предотвращения несчастных случаев [24] при массовом взрыве МЭЦ и МКЦ все люди отводятся на расстояние не менее 50 м от устья штольни, а их нахождение непосредственно напротив портала запрещается. Инициирование зарядов обрушения целиков производится из укрытия с поверхности.

Применяемое самоходное (ПДМ, буровые станки, автосамосвалы) и стационарное (вентиляторы местного проветривания, смесительно-зарядные машины) оборудование на период проведения массового взрыва МЭЦ и МКЦ размещается в гаражах на поверхности или в горных выработках нижележащего гор. 615 м.

Коммуникации в примыкающих выработках представлены стальным воздухопроводом местного значения, при выпуске руды целиков ПДМ в силу отсутствия потребителей сжатого воздуха более не используются. При предельно допустимом избыточном давлении на фронте УВВ для коммуникаций 60 кПа расстояние от места обрушения МЭЦ и МКЦ, на котором могут происходить повреждения местных коммуникаций, – до 400 м.

### Заключение

Таким образом, для условий подземной разработки Ветренского месторождения обоснованы параметры безопасности по действию УВВ при проведении массового взрыва по обрушению целиков. Для рассмотренных условий подземного рудника установлена зависимость избыточного давления на фронте УВВ от расстояния от места массового взрыва с учетом местных сопротивлений и влияния ведения добычи в криолитозоне. С учетом данных особенностей предложено учитывать при определении избыточного давления на фронте УВВ его двукратное увеличение в условиях постоянных отрицательных температур и попутного направления струи воздуха.



### Список литературы

1. Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Никитин И.В., Рожков А.А., Соломеин Ю.М., Дедов О.Ю., 2018. Особенности подземной разработки Ветренского золоторудного месторождения. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 4, С. 12 – 22. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-4-12-22.
2. Галченко Ю.П., Сабянин Г.В., 2011. *Проблемы геотехнологии жильных месторождений*. Москва: Изд-во «Научтехлитиздат», 367 с.
3. Барановский К.В., Смирнов А.А., Рожков А.А., Ключев М.В., 2021. Повышение эффективности комбинированной геотехнологии жильных золоторудных месторождений. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 3, С. 117 - 129. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-112-123.
4. Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., 2022. Обоснование рациональных параметров систем разработки наклонных жил малой и средней мощности при изменении криоусловий. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 2, С. 157 - 168. DOI 10.46689/2218-5194-2022-2-1-157-168.
5. Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Павлов А.М., 2022. Обоснование безопасных и эффективных систем разработки маломощных крутопадающих рудных тел на глубинах свыше 1000 м. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 2, С. 169 – 180. DOI 10.46689/2218-5194-2022-2-1-169-180.
6. Wu J., 2020. Research on sublevel open stoping recovery processes of inclined medium thick ore body on the basis of physical simulation experiments. *PLoS ONE*, vol. 15(5), e0232640. DOI: 10.1371/journal.pone.0232640
7. Li J.-G., Zhan K., 2018. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment. *Engineering*, Vol. 4, No. 3, P. 381 – 391. DOI: 10.1016/j.eng.2018.05.013
8. Avdeev A., Sosnovskaya E., 2020. Geomechanical conditions of veingold deposits in permafrost zone. *E3S Web of Conferences*, Vol. 192, P. 01026. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201026
9. Zubkov V.P., Petrov D.N., 2019. Problems and solutions in underground mining of non-ferrous and precious metal deposits in Yakutia. *IOP Conference Series*, Vol. 262, P. 012086. DOI 10.1088/1755-1315/262/1/012086.
10. Сентябов С.В., 2021. Выбор методов управления горным давлением в горных конструкциях камерной системы разработки. *Проблемы недропользования*, № 1(28), С. 73 – 80. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.073
11. Тапсиев А.П., Фрейдин А.М., Филиппов П.А., Усков В.А., Неверов А.А., Артеменко Ю.В., Вдовин Г.К., Садабаев К.Т., 2012. Обоснование параметров и проведение крупномасштабного взрыва на Макмальском руднике в условиях сейсмоопасной высокогорной зоны Тянь-Шаньского хребта. *Взрывное дело*, № 108 – 65, С. 316 – 332.
12. Павлов А.М., Сосновская Е.Л., 2013. Обоснование параметров геотехнологий выемки целиков крутопадающих жильных месторождений. *Известия вузов. Горный журнал*, № 3, С. 15 – 19.
13. Барановский К.В., Соломеин Ю.М., Антипин Ю.Г., 2018. Совершенствование технологии выемки запасов целиков и способа погашения выработанного пространства в условиях Кыштымского подземного рудника. *Проблемы недропользования*, №1(16), С. 5 – 12. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.01.005>
14. Рожков А.А., Барановский К.В., Смирнов А.А., Соломеин Ю.М., 2021. Обоснование параметров и технологии безопасной выемки целиков при подземной разработке золоторудного месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5 - 1, С. 41 – 54. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_51\_0\_41.
15. Athey J. E., Werdon M. B., Twelker E., Henning M. W., 2016. *Alaska's Mineral Industry 2015*. AK: Alaska Division of Geological & Geophysical Survey, Fairbanks. 45 p. DOI: 10.14509/29687.

16. Садовский М.А., 2004. *Избранные труды: Геофизика и физика взрыва*. Москва: Наука, 440 с.
17. Zharikov S., Kutuev V., 2020. *On the Issue of Defining Safe Distances and Overpressure Under Impact of Shock Air Blast Wave (Magnesitovaya Mine)*. E3S Web of Conferences, Vol. 192, P. 01027.
18. Ткач С.М., Курилко А.С., Соловьев Д.Е., 2021. Роль теплофизических исследований в обеспечении эффективности и безопасности эксплуатации шахт и рудников криолитозоны. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т. 8, № 1, С. 154 - 160. DOI 10.15372/FPVGN2021080124.
19. Сосновская Е.Л., Авдеев А.Н., 2020. Оценка первоначального напряженного состояния массива горных пород в криолитозоне (на примере Ирокиндинского месторождения). *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3 – 1, С. 208 - 215. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-208-215.
20. Кутузов Б.Н., 2009. *Безопасность взрывных работ в горном деле и промышленности: учебное пособие*. Москва: Горная книга, 671 с.
21. Меньшиков П.В., 2010. Исследование механизма воздействия ударной воздушной волны на объекты на земной поверхности при ведении взрывных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 321 – 325.
22. Меньшиков П.В., 2020. Определение максимального избыточного давления на фронте ударной воздушной волны для условий взрывных работ на карьере «Восточный» АО «Медвежья гора». *Проблемы недропользования*, № 2(25), С. 145 – 152. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.145.
23. Корнилков М.В., Шеменев В.Г., Меньшиков П.В., Синицын В.А., 2013. Факторы, влияющие на интенсивность ударной воздушной волны при изменяющихся метеорологических условиях. *Известия вузов. Горный журнал*, № 7, С. 65 – 70.
24. Morel G., Pillay M., 2019. The Occupational Risk Assessment Method: A Tool to Improve Organizational Resilience in the Context of Occupational Health and Safety Management. *Advances in Safety Management and Human Factors: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Safety Management and Human Factors. Series: Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer, Vol. 969. P. 367 – 376.

## References

1. Sokolov I.V., Smirnov A.A., Antipin Yu.G., Baranovskii K.V., Nikitin I.V., Rozhkov A.A., Solomein Yu.M., Dedov O.Yu., 2018. Osobennosti podzemnoi razrabotki Vetrenskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya [Features of the underground development of the Vetrensky gold deposit]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, № 4, P. 12 - 22. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-4-12-22.
2. Galchenko Yu.P., Sabyanin G.V., 2011. *Problemy geotekhnologii zhil'nykh mestorozhdenii* [Problems of geotechnology of vein deposits]. Moscow: Izd-vo "Nauchtekhlitizdat", 367 p.
3. Baranovskii K.V., Smirnov A.A., Rozhkov A.A., Klyuev M.V., 2021. Povyshenie effektivnosti kombinirovannoi geotekhnologii zhil'nykh zolotorudnykh mestorozhdenii [Increasing the efficiency of combined geotechnology of vein gold deposits]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 3, P. 117 – 129. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-112-123.
4. Avdeev A.N., Sosnovskaya E.L., 2022. Obosnovanie ratsional'nykh parametrov sistem razrabotki naklonnykh zhil maloi i srednei moshchnosti pri izmenenii kriuslovii [Substantiation of rational parameters of systems for the development of inclined veins of low and medium power under changing cryoconditions]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 2, P. 157 – 168. DOI: 10.46689 /2218-5194-2022-2-1-157-168.
5. Avdeev A.N., Sosnovskaya E.L., Pavlov A.M., 2022. Obosnovanie bezopasnykh i effektivnykh sistem razrabotki malomoshchnykh krutopadayushchikh rudnykh tel na glubinakh



svyshe 1000 m [Substantiation of safe and effective systems for the development of low-power steeply falling ore bodies at depths over 1000 m]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 2, P. 169 – 180. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-2-1-169-180.

6. Wu J., 2020. Research on sublevel open stoping recovery processes of inclined medium thick ore body on the basis of physical simulation experiments. *PLoS ONE*, vol. 15(5), e0232640. DOI: 10.1371/journal.pone.0232640

7. Li J.-G., Zhan K., 2018. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment. *Engineering*, Vol. 4, No. 3, P. 381 – 391. DOI: 10.1016/j.eng.2018.05.013

8. Avdeev A., Sosnovskaya E., 2020. Geomechanical conditions of veingold deposits in permafrost zone. *E3S Web of Conferences*, Vol. 192, P. 01026. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201026

9. Zubkov V.P., Petrov D.N., 2019. Problems and solutions in underground mining of non-ferrous and precious metal deposits in Yakutia. *IOP Conference Series*, Vol. 262, P. 012086. DOI 10.1088/1755-1315/262/1/012086.

10. Sentyabov S.V., 2021. Vybór metodov upravleniya gornym davleniem v gornykh konstruktsiyakh kamernoi sistemy razrabotki [Selection of methods for controlling rock pressure in mining structures of the chamber development system]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 1(28), P. 73 – 80. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.073

11. Tapsiev A.P., Freidin A.M., Filippov P.A., Uskov V.A., Neverov A.A., Artemenko Yu.V., Vdovin G.K., Sadabaev K.T., 2012. Obosnovanie parametrov i provedenie krupnomasshtabnogo vzryva na Makmal'skom rudnike v usloviyakh seismoopasnoi vysokogornoj zony Tian'-Shan'skogo khrebtá [Substantiation of parameters and carrying out a large-scale explosion at the Makmal mine in the conditions of the earthquake-prone high-altitude zone of the Tien Shan ridge]. *Vzryvnoe delo*, № 108 – 65, P. 316 – 332.

12. Pavlov A.M., Sosnovskaya E.L., 2013. Obosnovanie parametrov geotekhnologii vyemki tselikov krutopadayushchikh zhil'nykh mestorozhdenii [Substantiation of the parameters of geotechnologies for extraction of the pillars of steeply falling vein deposits]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, № 3, P. 15 – 19.

13. Baranovskii K.V., Solomein Yu.M., Antipin Yu.G., 2018. Sovershenstvovanie tekhnologii vyemki zapasov tselikov i sposoba pogasheniya vyrabotannogo prostranstva v usloviyakh Kyshtym'skogo podzemnogo rudnika . [Perfection of the technology for pillars extraction and of the method for worked-out space abandoning in the conditions of the Kyshtym underground mine]. *Problemy nedropol'zovaniya*, №1(16), P. 5 - 12. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2018.01.005>

14. Rozhkov A.A., Baranovskii K.V., Smirnov A.A., Solomein Yu.M., 2021. Obosnovanie parametrov i tekhnologii bezopasnoi vyemki tselikov pri podzemnoi razrabotke zolotorudnogo mestorozhdeniya [Substantiation of the parameters and technology of safe extraction of the pillars during the underground development of a gold deposit]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5 – 1, P. 41 – 54. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_51\_0\_41.

15. Athey J. E., Werdon M. B., Twelker E., Henning M. W., 2016. *Alaska's Mineral Industry 2015*. AK: Alaska Division of Geological & Geophysical Survey, Fairbanks. 45 p. DOI: 10.14509/29687.

6. Sadovskii M.A., 2004. Izbrannye trudy: Geofizika i fizika vzryva [Selected works: Geophysics and physics of explosion]. Moscow: Nauka, 440 p.

17. Zharikov S., Kutuev V., 2020. On the Issue of Defining Safe Distances and Overpressure Under Impact of Shock Air Blast Wave (Magnesitovaya Mine). *E3S Web of Conferences*, Vol. 192, P. 01027.

18. Tkach S.M., Kurilko A.S., Solov'ev D.E., 2021. Rol' teplofizicheskikh issledovanií v obespechenii effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii shakht i rudnikov kriolitozony [The role of thermophysical research in ensuring the efficiency and safety of the operation on shafts and

mines in the cryolithozone]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*, V. 8, № 1, P. 154 – 160. DOI 10.15372/FPVGN2021080124.

19. Sosnovskaya E.L., Avdeev A.N., 2020. Otsenka pervonachal'nogo napryazhennogo sostoyaniya massiva gornykh porod v kriolitozone (na primere Irokindinskogo mestorozhdeniya) [Assessment of the initial stress state of the rock mass in the cryolithozone (on the example of the Irokindinsky deposit)]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 3 - 1, P. 208 - 215. DOI:10.25018/0236-1493-2020-31-0-208-215.

20. Kutuzov B.N., 2009. Bezopasnost' vzryvnykh rabot v gornom dele i promyshlennosti: uchebnoe posobie [Safety of blasting operations in mining and production industry: a textbook]. Moscow: Gornaya kniga, 671 p.

21. Men'shikov P.V., 2010. Issledovanie mekhanizma vozdeistviya udarnoi vozdushnoi volny na ob"ekty na zemnoi poverkhnosti pri vedenii vzryvnykh rabot [Study of the impact mechanism of the air shock wave on objects on the Earth's surface during conducting explosive operations]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 11, P. 321 – 325.

22. Men'shikov P.V., 2020. Opredelenie maksimal'nogo izbytochnogo davleniya na fronte udarnoi vozdushnoi volny dlya uslovii vzryvnykh rabot na kar'ere "Vostochnyi" AO "Medvezh'ya gora" [Determination of the maximum excess pressure at the front of the shock air wave for the conditions of blasting operations at the Vostochny quarry of Medvezhya Gora JSC]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 2(25), P. 145 – 152. DOI: 10.25635/2313-1586. 2020.02.145.

23. Kornilkov M.V., Shemenov V.G., Men'shikov P.V., Sinitsyn V.A., 2013. Faktory, vliyayushchie na intensivnost' udarnoi vozdushnoi volny pri izmenyayushchikhsya meteorologicheskikh usloviyakh [Factors affecting the intensity of an air shock wave under changing meteorological conditions]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, № 7, P. 65 – 70.

24. Morel G., Pillay M., 2019. The Occupational Risk Assessment Method: A Tool to Improve Organizational Resilience in the Context of Occupational Health and Safety Management. *Advances in Safety Management and Human Factors: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Safety Management and Human Factors. Series: Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer, Vol. 969. P. 367 – 376.