

УДК 622.235.53

**Меньшиков Павел Владимирович**

научный сотрудник,  
лаборатория разрушения горных пород,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [menshikovpv@mail.ru](mailto:menshikovpv@mail.ru)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО  
ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ФРОНТЕ  
УДАРНОЙ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНЫ  
ДЛЯ УСЛОВИЙ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ  
НА КАРЬЕРЕ “ВОСТОЧНЫЙ”  
АО “МЕДВЕЖЬЯ ГОРА”\***

*Аннотация:*

При ведении взрывных работ на возвышенностях по отношению к охраняемым объектам и в широкой долине возможно негативное воздействие ударных воздушных волн (УВВ) на находящиеся вблизи отдельные жилые и промышленные здания и сооружения. Проанализированы факторы, влияющие на интенсивность распространения ударных воздушных волн. Проведен расчет максимального избыточного давления на фронте УВВ возле жилого дома и школы станции Дербентская по методике Б. Н. Кутузова для слабых УВВ при положительной и отрицательной температуре воздуха и методике М.А. Садовского для удлиненных скважинных зарядов для условий ведения взрывных работ на карьере «Восточный» АО «Медвежья гора» вблизи значительного скопления людей. Реальные фактические значения избыточного давления на фронте УВВ от массовых взрывов в карьере могут отличаться в зависимости от реальных метеорологических условий (температуры, атмосферного давления, относительной влажности, скорости и направления ветра). Актуальность данных исследований заключается в обеспечении промышленной безопасности взрывных работ.

*Ключевые слова:* взрывные работы, взрывные работы в долинах, массовый взрыв, ударная воздушная волна, избыточное давление на фронте УВВ, допустимое избыточное давление, граница опасной зоны, охраняемые объекты, промышленная безопасность взрывных работ

DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.145

**Menshikov Pavel V.**

Researcher,  
Laboratory of rock breaking,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka  
e-mail: [menshikovpv@mail.ru](mailto:menshikovpv@mail.ru).

**DETERMINATION OF THE MAXIMAL  
EXCESSIVE PRESSURE ON THE FRONT  
OF THE SHOCK AIR WAVE  
FOR EXPLOSIVE WORK CONDITIONS  
AT THE “VOSTOCHNY” CAREER  
OF JSC “MEDVEZHAYA GORA”**

*Abstract:*

When conducting blasting operations in upland in relation to the guarded objects and in a wide valley, the impact of shock air waves (air blasts) on separate residential and industrial buildings and structures located nearby is possible. The paper considers the factors affecting the intensity of propagation of shock air waves. The maximum overpressure at the air-blast front near the apartment building and the school of Derbentskaya settlement was calculated using the method of B. N. Kutuzov for weak air-blast at positive and negative air temperatures and the method of M. A. Sadovsky for elongated blasthole charges for blasting conditions in the “Vostochniy” quarry of JSC “Medvezhya gora” near a large concentration of people. Actual values of overpressure at the air-blast front from large-scale blasts in a quarry may differ depending on real climatic and meteorological conditions (temperature, atmospheric pressure, relative humidity, wind speed and direction). The relevance of these studies is to ensure the industrial safety of blasting.

*Keywords:* blasting operations, blasting in a valley, large-scale blast, shock air wave, air blast, overpressure at the air-blast front, permissible overpressure, boundary of the danger zone, guarded objects, industrial safety of blasting works

### Введение

Интенсивность распространения УВВ при ведении взрывных работ в карьерах зависит от множества факторов: одновременно взрывающейся массы заряда ВВ, расстояния до охраняемых объектов, встречающихся на пути волны преград (сооружений, лесного массива, неровностей местности), а также метеорологических условий (температуры воздуха, атмосферного давления, относительной влажности, скорости и направления ветра).

\* Исследования проведены в рамках выполнения Государственного задания 007-00293-19-00, тема № 0405-2016-0001.

Особенностью УВВ является сложный характер взаимодействия с сооружениями, ударные волны создают нагрузки, вызывающие колебательные движения конструкций [1]. Многие исследователи в своих трудах отмечают, что в условиях отрицательных температур величина избыточного давления на фронте УВВ увеличивается [2 –6]. Например, М. И. Ганопольский отмечает, что на малых расстояниях влияние метеоусловий сказывается незначительно, т.к. уменьшается воздействие аномальных и фокусирующих профилей градиентов скорости звука, приводящих к усилению УВВ [7]. Атмосферное давление также влияет на скорость распространения ударных воздушных волн [8, 9]. Так, например, одним из самых неблагоприятных условий проведения взрывных работ является наличие инверсии скорости ударных волн, когда их скорость с высотой сначала на некотором расстоянии уменьшается, затем увеличивается примерно на таком же расстоянии, а затем вновь уменьшается. Особенностью таких метеоусловий является образование зоны относительного покоя возле места взрывных работ, на определенном расстоянии от которой возникает зона интенсивного фокусирования повышенного избыточного давления вследствие преломления ударных воздушных волн, возвращающихся к поверхности земли в одно и то же время [10, 11]. Изменениями в скорости ударных волн, вызванными колебаниями относительной влажности воздуха, часто пренебрегают. Распределение температуры воздуха является наиболее важным фактором метеоусловий [10]. Скорость и направление ветра при прогнозировании интенсивности воздействия УВВ является существенным дополнительным фактором [12, 13]. Например, Б. Н. Кутузов отмечает, что нужно учитывать направление ветра при высокой его скорости. Взрывные работы необходимо отложить, если ветер направлен в сторону жилых районов в том случае, когда существует положительный температурный градиент и скорость ветра составляет более 6,5 м/с [14].

При взрывании в узких долинах может возникать негативное воздействие УВВ на находящиеся вблизи отдельные жилые и промышленные здания и сооружения ближайших населенных пунктов в результате сосредоточения градиента избыточного давления на фронте УВВ между двумя боковыми преградами (в ложбине оврага или в ущелье) [15 – 18]. При этом безопасное расстояние должно быть увеличено в 2 раза согласно ФНиП «ПБ при ВР» [19]. Но особенности распространения УВВ при взрывании в широких долинах не рассматриваются в научной литературе, т.к. считается, что интенсивность УВВ остается без изменений, тем не менее может сохраняться вероятность негативного воздействия УВВ на открытых участках при отсутствии преград между эпицентром взрыва и охраняемым объектом, тем более если взрывные работы при этом ведутся на возвышенности. На горном предприятии АО «Медвежья гора» при отработке северо-восточного участка карьера «Восточный» фронт горных работ подходит к жилым домам станицы Дербентская. Ситуация осложняется тем, что карьер «Восточный» расположен на возвышенности, которая плавно снижается в восточном направлении в сторону населенного пункта, а сам ландшафт представляет собой широкую долину. В связи с тем что карьер «Восточный» АО «Медвежья гора», расположен вблизи значительного скопления людей, согласно п. 856 ФНиП «ПБ при ВР» [19], был проведен проверочный расчет безопасных расстояний при производстве взрывных работ на этом карьере. Целью работы являлось определение безопасных расстояний от воздействия УВВ на людей и охраняемые объекты.

Рельеф района Дербентского месторождения характеризуется сглаженным ландшафтом с широкими долинами и невысокими горами, относительная высота которых колеблется от 100 до 500 м. Гора Медвежья имеет максимальную абсолютную высоту 491 м, в восточном и западном направлениях хребет постоянно снижается [20].

В непосредственной близости от зоны ведения взрывных работ на северо-восточном участке карьера «Восточный» АО «Медвежья гора» Дербентского месторождения известнякового конгломерата находятся деревянные жилые дома барачного типа на ул. Калинина и Свердлова станицы Дербентская, коттеджи из шлакоблока и деревянного

бруса и кирпичное здание основной общеобразовательной школы № 12 станицы Дербентская в восточном направлении. Ближайшим охраняемым объектом к зоне взрывных работ является деревянный жилой дом № 29 на ул. Калинина, находящийся на расстоянии 870 м (рис. 1). Кирпичное здание основной общеобразовательной школы № 12 с большим скоплением людей находится на расстоянии 1330 м (рис. 2).



Рис. 1 – Деревянный жилой дом № 29 на ул. Калинина



Рис. 2 – Кирпичное здание основной общеобразовательной школы № 12

План местности с расположением карьера «Восточный» АО «Медвежья гора» и охраняемых объектов станции Дербентская представлен на рис. 3.

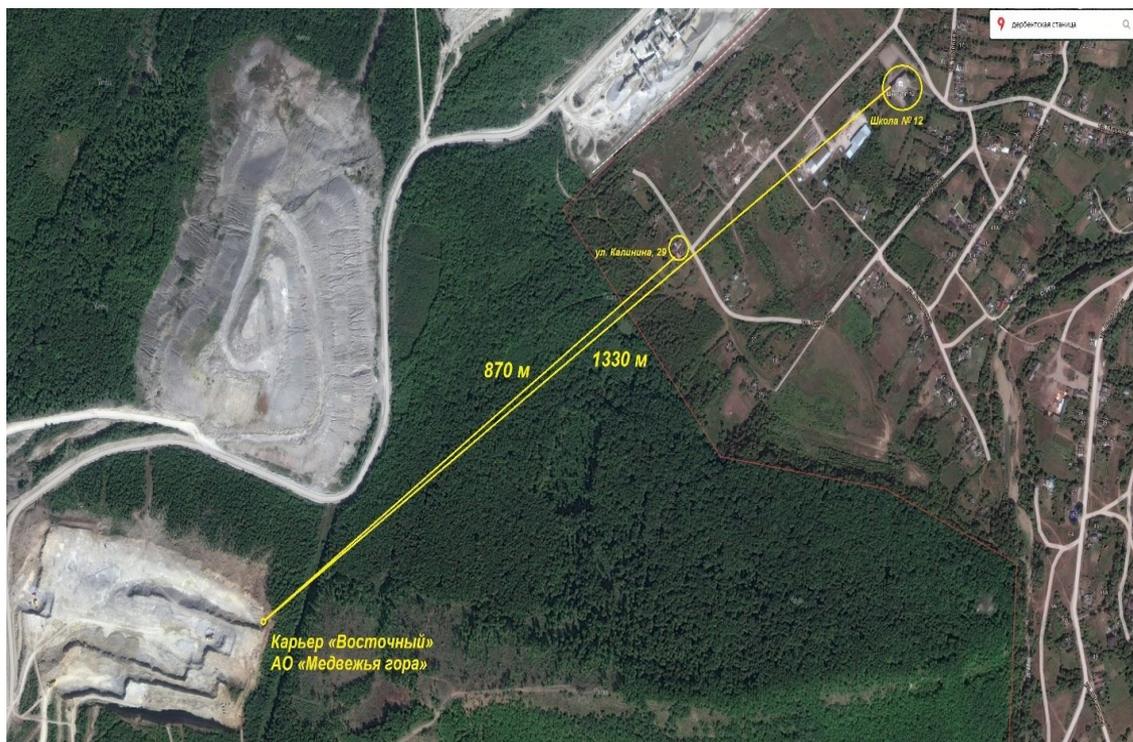


Рис. 3 – План местности с расположением карьера «Восточный» АО «Медвежья гора» и охраняемых объектов станции Дербентская

### Теория и результаты

Применяемые в [21] величины безопасных расстояний по воздействию УВВ на застекление в зависимости от температуры воздуха и времени замедления, приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Величина безопасного расстояния по воздействию УВВ на застекление**

Эквивалентная масса заряда взрывчатых веществ $Q$ , кг	Безопасное расстояние $R_{УВВ}$ , м							
	При положительной температуре воздуха и времени замедления, мс				При отрицательной температуре воздуха и времени замедления, мс			
	Более 50	30-50	20-30	10-20	Более 50	30-50	20-30	10-20
1	63	76	95	126	95	114	143	189
2	100	120	150	200	150	180	225	300

Радиусы опасных зон рассчитаны для каждого конкретного взрываемого блока. В результате округления безопасного расстояния по воздействию УВВ на застекление в большую сторону максимальный радиус опасной зоны по воздействию УВВ был принят равным 300 м.

Определение максимального избыточного давления на фронте УВВ при известных расстояниях до точек и параметрах буровзрывных работ (БВР) возможно по методике

Б.Н. Кутузова для слабых ударных волн и методике М. А. Садовского для удлинённых скважинных зарядов.

К слабым УВВ относятся волны, у которых давление на фронте УВВ меньше 10 кПа. Согласно Б. Н. Кутузову [14] для слабых ударных воздушных волн при взрывах в карьерах избыточное давление на фронте УВВ (Па) определяется по следующей формуле:

$$\Delta p = 4,7 \cdot 10^5 k_T k_M \sqrt{q_3} / R, \tag{1}$$

где  $q_3$  – эквивалентная масса ВВ, кг. Для взрыва группы скважинных зарядов длиной более 12 диаметров скважины эквивалентный заряд определяется по формуле

$$q_3 = 12p \cdot k_{заб}^2 \cdot m \cdot d_{скв.}, \tag{2}$$

где  $p$  – удельная вместимость скважины, кг/п. м. В [21] при диаметрах скважин  $d_{скв.} = 102, 115$  и  $130$  мм  $p = 11,2; 14,2$  и  $18,2$  кг/п.м, соответственно;

$k_{заб}$  – коэффициент, учитывающий влияние забойки скважины на параметры УВВ. Из [21] для нитронита при грунтовой забойке и соотношениях  $l_{заб} / d_{скв.} = 24,5; 28,7$  и  $40,8$  принимается  $k_{заб} = 0,03$ ;

$m$  – число мгновенно взрывающихся скважинных зарядов; при поскважинном взрывании  $m = 1$ ;

$k_T$  – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств взрывающихся пород. Горные породы – известняки крупно-, средне- и мелкообломочные, песчаники крупно- и мелкозернистые. Разрабатываемые карьером известняковые конгломераты относятся к VII группе грунтов по классификации СНиП, тогда  $k_T = 0,1$ ;

$k_M$  – коэффициент, учитывающий вероятность появления неблагоприятных условий, зависящий от сезонности и расстояния. На расстояниях от 200 до 2000 м в период положительной температуры воздуха для периода «апрель – октябрь»  $k_M = 3(R^{1/2}/2000)$ ; в период отрицательной температуры воздуха для периода «ноябрь-март»  $k_M = 5(R^{1/2}/2000)$ . Для жилого дома № 29 на ул. Калинина ( $R = 870$  м)  $k_M = 0,04$  и  $0,07$  в период положительной и отрицательной температуры, соответственно. Для школы № 12 ( $R = 1330$  м)  $k_M = 0,05$  и  $0,09$  в период положительной и отрицательной температуры, соответственно.

Результаты расчетов избыточного давления на фронте УВВ по методике Б.Н. Кутузова в данных точках представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетное избыточное давление на фронте УВВ (по методике Б. Н. Кутузова)

Охраняемый объект	Расстояние от эпицентра взрыва $R$ , м	Диаметр скважины, $d_{скв.}$ , м	Избыточное давление на фронте УВВ, Па	
			При положительной температуре воздуха	При отрицательной температуре воздуха
Жилой дом на ул. Калинина, 29	870	0,102	0,24	0,42
		0,115	0,29	0,50
		0,130	0,35	0,60
Основная общеобразовательная школа № 12 станицы Дербентская	1330	0,102	0,20	0,35
		0,115	0,23	0,42
		0,130	0,28	0,51

По данным М.И. Картузова, стекла толщиной 0,002 – 0,003 м разрушаются при избыточном давлении 600 – 1800 Па [22, 23]. Согласно ФНиП «ГБ при ВР» [19] предельно допустимое значение избыточного давления на фронте УВВ для остекления составляет 2 кПа. Из табл. 2 видно, что расчетные значения избыточного давления на фронте УВВ возле охраняемых объектов намного ниже допустимого избыточного давления, равного 600 Па.

При взрывании удлиненных скважинных зарядов приведенный радиус взрыва относительно известного избыточного давления  $\Delta P_{\phi}$  (Па) определяется по следующей эмпирической формуле М. А. Садовского [15]:

$$\bar{R} = \sqrt[3]{\left[1 + \frac{337}{\Delta P_{\phi}}\right]^2 - 1}. \quad (3)$$

Масса ВВ в тротиловом эквиваленте с учетом подстилающей поверхности (грунта)

$$M_T = 2 \cdot \eta \cdot Q, \quad (4)$$

где  $\eta$  – коэффициент подстилающей поверхности грунта (для почвы  $\eta = 0,6$ );

$Q$  – масса ВВ скважинного заряда, кг.

Безопасное расстояние от источника взрыва до фронта ударной волны с избыточным давлением  $\Delta P_{\phi}$  с учетом коэффициента запаса

$$R = \bar{R} \cdot (M_T)^{1/3} \cdot 1,5. \quad (5)$$

Тогда из формул (3) – (5) можно определить избыточное давление на фронте УВВ  $\Delta P_{\phi}$ :

$$\Delta P_{\phi} = \frac{337}{\left(\sqrt{\frac{R^3}{6,75 \eta \cdot Q} + 1} - 1\right)}. \quad (6)$$

Результаты расчетов избыточного давления на фронте УВВ по методике М. А. Садовского в данных точках представлены в табл. 3

Таблица 3

**Расчетное избыточное давление на фронте УВВ  
(по методике М. А. Садовского)**

Охраняемый объект	Расстояние от эпицентра взрыва $R$ , м	Масса ВВ скважинного заряда $Q$ , кг	Избыточное давление на фронте УВВ, Па
Жилой дом на ул. Калинина, 29	870	106	0,27
		122,5	0,29
		123,7	0,29
Основная общеобразовательная школа № 12 станицы Дербентская	1330	106	0,14
		122,5	0,15
		123,7	0,16

Из табл. 2 и 3 видно, что избыточное давление на фронте УВВ, рассчитанное по методикам Б. Н. Кутузова и М. А. Садовского не превышает величин предельно допустимого давления. Результаты расчетов по двум методикам приблизительно одинаковые.

#### Выводы

1. Расчетные значения избыточного давления на фронте УВВ для остекления охраняемых объектов по методикам Б. Н. Кутузова и М. А. Садовского не превышают величин предельно допустимого избыточного давления. При отрицательной температуре воздуха величины избыточного давления приблизительно в 1,5 – 2 раза больше, чем при положительной температуре.

2. Значения избыточного давления для людей, расположенных вне укрытий, намного ниже предельных значений, т.к. согласно [19] для людей предельное допустимое избыточное давление на фронте УВВ составляет 10 кПа и считается достаточно безопасным. Легкие поражения человека наступают при избыточном давлении 20 – 40 кПа.

3. Реальные фактические значения избыточного давления на фронте УВВ от массовых взрывов в карьере могут отличаться в зависимости от реальных климатических и метеорологических условий (температуры, атмосферного давления, относительной влажности, скорости и направления ветра). Если ветер направлен в сторону жилых домов и школы станции Дербентская и скорость ветра составляет более 6,5 м/с, то массовый взрыв необходимо отложить.

#### Литература

1. Абдрахманов Н. Х. Взаимодействие воздушной ударной волны с наземными объектами / Н. Х. Абдрахманов, Ю. В. Волкова. – DOI: <http://dx.doi.org/10.17122/ogbus-2013-6-432-444> // Нефтегазовое дело. – 2013. – № 6 – С. 432 - 444. – URL: <http://ogbus.ru/issue/archive> (дата обращения: 19.05.2020)
2. Simoni S. Field measurements of snowpack response to explosive loading Cold Regions / S. Simoni, R. Sidler, J. Dual, J. Schweizer // Science and Technology J. – 2015 – V. 120 – P. 179 - 190.
3. Miller D. A. An explicit numerical model for the study of snow's response to explosive air blast Cold Regions / D. A. Miller, R. G. Tichota, E. E. Adams // Science and Technology – 2011. – V. 69 (2-3) – P. 156 - 164.
4. Ground vibrations produced by surface and near-surface explosions / D. G. Albert, S. N. Decato, S. Taherzadeh, K. Attenborough, P. Boulanger // Applied Acoustics. – 2013. – Т. 74. – № 11. – С. 1279 - 1296.
5. Цейтлин Я. И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов / Я. И. Цейтлин, Н. И. Смолий. – Москва : Недра, 1981. -192 с.
6. Безопасность сейсмического и воздушного воздействия массовых взрывов: учебное пособие / Б. Н. Кутузов, В. К. Совмен, Б. В. Эквист, В. Г. Варганов. – Москва: Московский государственный горный университет, 2004. – 181 с.
7. Ганопольский М. И. Результаты экспериментальных исследований ударных воздушных волн при взрывах на земной поверхности: Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала) / М. И. Ганопольский. – Москва: Горная книга, 2011. – № 5. – 38 с.
8. Banister J. R. Observed high-altitude pressure waves from an underground and a surface explosion / J. R. Banister, W. V. Hereford // Journal of Geophysical Research. – 1991. – V. 96 (D3). – P. 5185 – 5193.
9. Gitterman Y. GT0 explosion sources for IMS infrasound calibration: charge design and yield estimation from near-source observations / Y. Gitterman, R. Hofstetter // Pure and Applied Geophysics. – 2014. – Т. 171. – № 3 - 5. – С. 599 - 619.
10. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Правила безопасности при взрывных работах: утверждены Приказом Ростехнадзора от

16 декабря 2013 № 605, в ред. Приказа Ростехнадзора от 30.11.2017 № 518. - Москва, 2013. – Серия 13. – Вып. 14. – 244 с.

11. Факторы, влияющие на интенсивность ударной воздушной волны при изменяющихся метеорологических условиях / М. В. Корнилков, В. Г. Шеменев, П. В. Меньшиков, В. А. Сеницын // Известия вузов. Горный журнал. – 2013. – № 7. – С. 65 - 71.

12. Kim K. Waveform inversion of acoustic waves for explosion yield estimation / K. Kim, A. Rodgers // Geophys. – Res. Lett. 43. – 2016 – P. 6883–6890.

13. Цейтлин Я. И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов / Я. И. Цейтлин, Н. И. Смолий. – Москва : Недра, 1981. – 192 с.

14. Bulson P.S. Explosive Loading of Engineering Structures: a history of research and review of recent development / P. S. Bulson // E&FN SPON, London, 1997 – 236 p.

15. Кутузов Б. Н. Безопасность взрывных работ в горном деле и промышленности: учебное пособие / Б. Н. Кутузов. – Москва : Горная книга, 2009. – 671 с.

16. Садовский М. А. Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований / М. А. Садовский // Механическое действие взрыва. – Москва: ИДГ РАН, 1994. – С. 7 - 102.

17. Weitzel, William R. Evaluation of overpressure wave transition by airblast overpressure and shock wave attenuation analysis using a small black powder charge : Theses and Dissertations-Mining Engineering / R. Weitzel, William. – 2014. – 17.

18. Азаркович А. Е. Взрывные работы вблизи охраняемых объектов / А. Е. Азаркович, М. И. Шуйфер, А. П. Тихомиров. – Москва : Недра, 1984. – 213 с.

19. Cook M. A. Air Blast and Ground Shock Waves Generated at Long Distances from Demolitions of High Explosives / M. A. Cook, R. T. Keyes and W. O. Ursenbach // Journal of Applied Meteorology. – 1962 – Vol. 1. – No. 1. – P. 91-101.

20. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Правила безопасности при взрывных работах : утверждены Приказом Ростехнадзора от 16 декабря 2013 г. № 605, в ред. Приказа Ростехнадзора от 30.11.2017 № 518 . – Москва, 2013. – Серия 13. – Вып. 14. – 244 с.

21. Рабочий проект разработки и рекультивации Дербентского месторождения известняковых конгломератов (Восточный участок) в Северском районе. Том 1 / ООО «Нерудгео-М». – Краснодар, 2005. – Часть 1 - 3. – 70 с.

22. Типовой проект взрывных работ на Дербентском месторождении известнякового конгломерата карьера «Восточный» АО «Медвежья гора», ООО «АВТ-УралСервис». – Новороссийск, 2019. – 42 с.

23. Разработка сейсмобезопасной технологии ведения взрывных работ на Мельнично-Паленихинском карьере комбината «Магнезит»: отчет о НИР / ИГД МЧМ СССР; рук. М. И. Каргузов. № ГР 0189.0075784. Инв. № 02910009098. – Свердловск, 1990. – 54 с.

24. Исследование влияния сейсмических и воздушных волн на здания города и промплощадки при взрывах в карьере Ковдорского ГОКа: отчет о НИР / ИГД МЧМ СССР; рук. М. И. Каргузов. № ГР 0184.0040746. Инв. № 02860068374. – Свердловск, 1986. – 68 с.