



**АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВОВ
НА ПОДЗЕМНЫЕ ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ ШАХТЫ “МАГНЕЗИТОВАЯ”**

В. А. Кутуев, П. В. Меньшиков, С. Н. Жариков

*Институт горного дела УрО РАН, E-mail: slavik1988@mail.ru,
ул. Мамина-Сибиряка 58, г. Екатеринбург 620075, Россия*

Проведена оценка сейсмического воздействия технологических взрывов на подземные горные выработки шахты “Магнетитовая”. Определена сейсмическая устойчивость горных пород шахты “Магнетитовая” и рассчитаны безопасные расстояния от технологических взрывов по допустимому сейсмическому эффекту для горных пород. Для определения динамического воздействия на выработки использованы сейсморегистраторы “Уран” и Minimate Plus с трехкомпонентными сейсмоприемниками. Даны рекомендации по установлению ограничения массы ВВ в ступени замедления на уровне минимальных опасных значений при проведении технологических взрывов в подземном руднике.

Сейсмическое действие взрыва, взрывные работы, сейсморегистраторы, промышленная безопасность, безопасные расстояния, максимальная скорость сейсмических колебаний, допустимая скорость колебаний, сейсмостойчивость

**ANALYSIS OF EXPLOSION EFFECTS
ON UNDERGROUND MINE WORKINGS OF THE MAGNEZITOVAYA MINE**

V. A. Kutuev, P. V. Menshikov, and S. N. Zharikov

*Institute of Mining, the Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: slavik1988@mail.ru, ul. Mamina-Sibiryaka 58, Ekaterinburg 620075, Russia*

The seismic effect of man-induced explosions on underground mine workings of the Magnezitovaya mine was assessed. The seismic stability of rocks in the Magnezitovaya mine was determined and safe distances from man-induced explosions were calculated based on the permissible seismic effect for rocks. To establish the dynamic impact on the workings, the “Uran” and Minimate Plus seismic recorders with three-component seismic receivers were used. As a result of comparison of the calculated values and the results of experimental measurements, recommendations are given for setting a limit on the mass of explosives in the deceleration stage at the level of minimum dangerous values during man-made explosions in an underground mine.

Seismic effect of an explosion, blasting operations, seismic recorders, industrial safety, safe distances, peak vibration velocity, permissible vibration velocity, seismic stability

Цель работы заключается в определении максимальной скорости сейсмических колебаний грунта в подземных горных выработках при веерной скважинной отбойке на шахте “Магнетитовая” ПАО “Комбинат Магнетит”.

Для определения допустимого значения скорости сейсмических колебаний необходимо установить допустимую величину напряжений в массиве, которая находится в соответствии с условием сейсмостойчивости выработки [1]:

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФНИ (проект № 075-00581-19-00), а также при дополнительном привлечении хозяйственных средств.

$$[\sigma_{\text{ст}}] + [\sigma_{\text{дин}}] \leq \sigma_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где $[\sigma_{\text{ст}}]$ — статическое напряжение в массиве, окружающем выработку, МПа; $[\sigma_{\text{дин}}]$ — динамическое напряжение в массиве (около выработки), МПа; $\sigma_{\text{доп}}$ — допустимая величина напряжений, МПа.

Величины пределов прочности на растяжения для образца и массива горных пород существенно отличаются (в 5–10 раз и более). Достоверно оценить величину статического предела прочности массива можно только экспериментально, что невозможно на начальных стадиях проектирования. В некоторых случаях возможен приближенный расчет с учетом среднего коэффициента структурного ослабления и на основе паспорта прочности горных пород. В грубом приближении за допустимую величину напряжений $\sigma_{\text{доп}}$ можно принимать статический предел прочности пород на растяжение σ_p увеличенный на 10–30 % [2].

В [1] приведена формула для расчета допустимой скорости смещения массива. Анализ формулы, ее преобразование и сравнение с фактическими данными измерений показали, что значения получаются немного заниженными и составляют в среднем до 79 % от измеренных величин. При переводе значений, ввиду округлений также образуется погрешность, уменьшающая значение на величину 4 %. В целом получается около 75 % от средней фактической величины. Соответственно выражение используется в следующем виде:

$$v_d = \frac{\sigma_d}{\gamma C} 2604.1 \text{ м/с}, \quad (2)$$

где σ_d — допустимая величина напряжений, МПа; γ — плотность пород, т/м³; C — скорость звука в породе, м/с.

Скорость сейсмических колебаний в зависимости от массы ВВ в ступени и расстояния от взрыва до охраняемого объекта может быть определена согласно [3] по следующему выражению (при расстоянии до объекта менее 1500 м):

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^m \text{ см/с}, \quad (3)$$

где Q — масса одновременно взрываемых зарядов (масса ВВ в ступени замедления), кг; R — расстояние до объекта, м; K — коэффициент, зависящий от условий взрывания. Значение K изменяется в зависимости от пород в месте взрыва и от пород, окружающих выработку. При взрыве скальных пород и окружающих выработку скальных породах $K = 200$, при взрыве скальных пород и окружающих выработку полускальных породах $K = 400$, при взрыве полускальных пород и окружающих выработку полускальных породах $K = 600$; m — показатель затухания сейсмических волн (для расстояний до 1500 м K может быть принят равным 1.5).

Тогда зависимость (3) может быть представлена в виде:

$$v = K \sqrt{\frac{Q}{R^3}}, \text{ см/с}, \quad (4)$$

Предназначение формулы (4) заключается в определении скорости сейсмических колебаний в массиве горных пород. Отличительная особенность расчета для подземных условий состоит в том, что кроме массива еще имеет значение вид крепи, который выражается коэффициентом сейсмоустойчивости $K_{\text{св}}$ (табл. 1).

Установив допустимую скорость сейсмических колебаний для охраняемого участка пород, можно определить расстояния, на которых взрывные работы своим воздействием не приведут к потере устойчивости горного массива около подземных выработок.

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные и расчетные значения сейсмоустойчивости пород

Порода	Плотность, т/м ³	Прочность на сжатие в образце, МПа	Прочность на растяжение в образце, МПа	Прочность на сдвиг в образце, МПа	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, ГПа	Скорость продольных волн, м/с	Скорость поперечных волн, м/с	Принятый коэффициент структурного ослабления	Прочность на сжатие в массиве, МПа	Прочность на растяжение в массиве, МПа	Принятая допустимая величина напряжений, МПа	Допустимая скорость сейсмических колебаний, м/с
Магнезит	2.7	110.0	6.0	14.7	0.18	37.7	3893.7	2432.4	0.10	11.00	0.60	0.66	0.16
	2.8	130.0	10.2	17.3	0.19	54.8	4635.4	2867.6	0.10	13.00	1.02	1.12	0.23
	2.9	150.0	14.5	20.0	0.20	83.0	5639.2	3453.3	0.40	60.00	5.80	6.38	1.02
	3.0	170.0	18.3	22.7	0.21	87.2	5720.1	3465.7	0.40	68.00	7.32	8.05	1.22
	3.1	190.4	23.0	25.4	0.22	91.3	5798.7	3474.2	0.40	76.16	9.20	10.12	1.47
Доломит	2.7	178.0	11.9	35.6	0.27	72.8	5396.3	3029.0	0.10	17.80	1.19	1.31	0.23
	2.8	185.0	12.3	37.0	0.28	80.4	5671.0	3134.8	0.10	18.50	1.23	1.36	0.23
	2.8	193.0	14.8	38.6	0.29	92.0	6066.3	3299.2	0.40	77.20	5.94	6.53	1.00
	2.9	198.0	18.0	39.6	0.30	96.6	6216.1	3322.6	0.40	79.20	7.20	7.92	1.16
	2.9	202.4	18.4	40.5	0.31	101.2	6362.4	3338.7	0.40	80.96	7.36	8.10	1.14
Сланцы	2.7	48.0	4.4	9.6	0.23	81.9	5723.6	3389.3	0.10	4.80	0.44	0.48	0.08
	2.8	62.0	5.6	12.4	0.24	86.4	5878.8	3438.5	0.10	6.20	0.56	0.62	0.10
	2.8	76.0	8.3	15.2	0.25	91.0	6033.2	3483.3	0.10	7.60	0.83	0.91	0.14
	2.9	90.0	8.2	18.0	0.26	95.6	6183.8	3521.7	0.10	9.00	0.82	0.90	0.13
	2.9	104.5	9.5	20.9	0.27	100.1	6327.7	3551.8	0.10	10.45	0.95	1.05	0.15
Диабаз	2.7	168.0	12.0	33.6	0.24	53.7	4634.7	2710.8	0.10	16.80	1.20	1.32	0.27
	2.8	180.6	13.9	36.1	0.25	68.3	5226.9	3017.7	0.10	18.06	1.39	1.53	0.28
	2.8	190.0	19.0	38.0	0.26	93.0	6099.2	3473.5	0.40	76.00	7.60	8.36	1.27
	2.9	212.3	19.3	42.5	0.27	97.7	6251.4	3509.0	0.40	84.92	7.72	8.49	1.24
	2.9	219.0	19.9	43.8	0.28	102.3	6396.9	3536.0	0.40	87.60	7.96	8.76	1.23

Для определения допустимых расстояний от места ведения взрывных работ до охраняемого участка пород путем преобразования формулы (4) можно выразить R , где $v_{\text{доп}}$ вычислена по формуле (2) и получить выражение следующего вида:

$$R = \sqrt[3]{\frac{QK^2}{v_d^2}} \text{ м.} \quad (5)$$

В процессе проектирования масса ВВ в ступени замедления должна рассчитываться с учетом свойств горного массива и характеристик защищаемых выработок. Скорость колебаний при этом следует рассчитывать по формулам (2) и (3), коэффициент K и показатель затухания сейсмических колебаний t определяются инструментальными замерами. При отсутствии последних можно использовать многовариантные расчеты и их сравнение, а в некоторых случаях усредненную зависимость, полученную обобщением результатов исследований параметров сейсмических волн в скальных массивах крепостью f по шкале Протодяконова от 8 до 16 [2]:

$$v = 225 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.6} \text{ см/с.} \quad (6)$$

ТАБЛИЦА 2. Результаты инструментальных замеров скоростей сейсмических колебаний

Дата взрыва, (время, ч)	Место замера	Регистратор (номер точки)	Место взрыва	Скорость сейсмических колебаний, м/с				Допустимая	Максимальная масса взрываемого заряда ВВ в ступени замедления, кг	Расстояние от места взрыва до места замера, м
				Максимальная волна						
				Продольная V_x	Поперечная V_y	Вертикальная V_z	Результирующая V			
03.02.2020 (23:00)	Камера № 16, блок № 4, гор. + 200 м	Уран (т. 1)	Очистная камера № 1, блок № 5, гор. +220 м	0.0025	0.0057	0.0042	0.0075	0.24	84	62
	Камера № 5, блок № 5, гор. + 200 м	Уран (т. 2)		0.0045	0.0033	0.0057	0.008			50
	Снаряжение ППШ 5-го блока и заезда к рудоспуску на гор. + 220 м	Уран (т. 3)		0.0377	0.0403	0.0428	0.0698			90
	Камера № 18, блок № 4, гор. + 200 м	MiniMate Plus (т. 4)		0.0056	0.0039	0.0084	1.08			123
04.02.2020 (23:50)	Камера № 16, блок № 4, гор. + 200 м	Уран (т. 1)		0.0057	0.0026	0.0058	0.0085			60
	Камера № 6, блок № 5, гор. + 200 м	Уран (т. 2)		0.0072	0.0034	0.0089	0.0119			65
	Снаряжение ППШ 5-го блока и заезда к рудоспуску на гор. + 220 м	Уран (т. 3)		0.0228	0.021	0.0299	0.0431			85
	Камера № 18, блок № 4, гор. + 220 м	MiniMate Plus (т. 4)		0.013	0.0089	0.012	0.0198			92

Сохранность пройденных выработок обеспечивается, если фактическая скорость смещения v не превысит допустимую величину v_d с учетом вида крепи. Сама крепь существенно повышает сейсмостойчивость выработок и может быть отражена коэффициентом K_{cy} (табл. 1). Допустимая скорость колебаний в этом случае определяется, согласно [3], с учетом назначения выработок:

$$v_d = \frac{v}{K_{cy}} \text{ см/с.} \quad (7)$$

Значения коэффициента сейсмоустойчивости для разных видов крепи: без крепи — 1.0; набрызг-бетон — 1.2–1.6; анкерная или штанговая — 1.6–2.0; бетонная — 2.2; Металлическая арочная — 2.5–3.0

Расчет сейсмоустойчивости пород при производстве взрывных работ выполнен в соответствии с ТЗ для пород шахты “Магнетитовая”. Необходимые исходные данные для расчета сейсмоустойчивости в предоставленных геологических материалах приведены не в полном объеме. Поэтому часть данных для расчета принята из справочной литературы [4–10] (табл. 1).

Допустимое значение скорости колебаний может быть достаточно большим. При этом необходимо учитывать, что структурное ослабление и начальные прочностные свойства пород, заложенные в расчет, могут отличаться от свойств конкретного участка массива. В этой связи, необходимо вводить ограничение по сейсмичности, которое для ответственных выработок согласно [3] составляет 0.24 м/с и соответствует предельным колебаниям при землетрясении 8 баллов [10]. В некоторых случаях (табл. 1) наблюдаются превышения минимально допустимых скоростей (отмечено серым цветом). Эти значения в дальнейших расчетах заменяются на предельное значение 0.24 м/с.

Измерения и регистрация параметров сейсмических колебаний выполнялись методом многоканальной регистрации механических колебаний с записью на цифровые сейсморегистраторы “Уран” с тремя сейсмодатчиками GS-20DX (ООО “Горизонт”, Россия, г. Екатеринбург) и MiniMate Plus с сейсмоприемником Series III Standard Transducer (“Instantel”, Канада, г. Онтарио) [11–14]. Регистрация параметров осуществлялась по трем составляющим (осям): продольной — x , поперечной — y и вертикальной — z .

Результаты замеров скорости сейсмических колебаний и схемы расположения сейсморегистраторов в подземных горных выработках относительно мест ведения взрывных работ, представлены в табл. 2 и на рисунке.

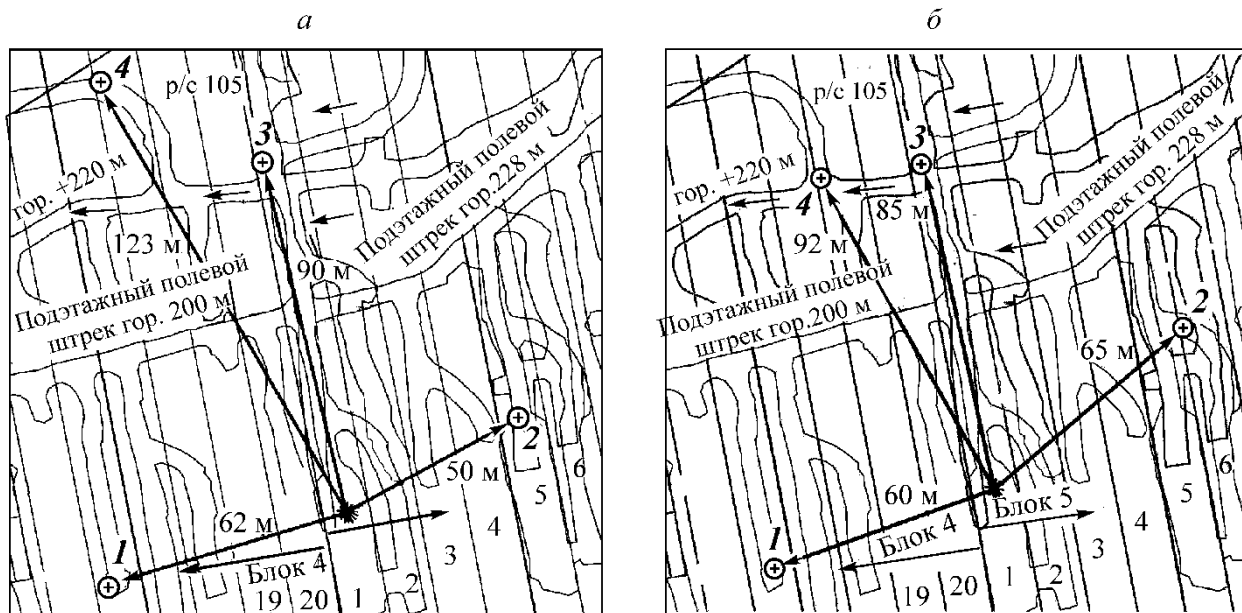


Схема расположения точек измерений 3 февраля (а) и 4 февраля (б) 2020 г. и места ведения взрывных работ (очистная камера № 1, блок № 5, гор. +220 м)

ВЫВОДЫ

Определена сейсмическая устойчивость горных пород шахты “Магнетитовая” и рассчитаны безопасные расстояния от взрывов по допустимому сейсмическому эффекту. Согласно расчетам, для массы ВВ в ступени замедления от 328 до 677 кг безопасные расстояния по массиву без

крепи в зависимости от того, в какой породе происходит взрыв, следующие (изменяется соответственно интервалу массы ВВ в ступени): в приповерхностных грунтах — от 48–62 м (скальный) до 112–126 м (полускальный); в магнезите — от 37–49 м (скальный) до 87–98 м (полускальный); в доломите — от 29–38 м (скальный) до 68–77 м (полускальный); в сланцах — от 59–77 м (скальный) до 138–156 м (полускальный); в диабазе — от 30–39 м (скальный) до 70–80 м (полускальный).

Показано, что более детальный учет свойств массива приводит к увеличению расчетного безопасного расстояния, так как начинают дополнительно учитываться свойства полускального массива. С точки зрения безопасности из двух вариантов расстояний в диапазоне необходимо всегда выбирать большее, в этом случае вероятность возникновения повреждений меньше.

Во время проведения технологического взрыва 3 февраля 2020 г. на шахте “Магнезитовая” максимальная результирующая скорость сейсмических колебаний грунта составила 0.0698 м/с возле снаряжения ПППШ блока № 5 и заезда к рудоспуску на гор. + 220 м. Измеренное максимальное значение скорости сейсмических колебаний меньше допустимой скорости для ответственных горных выработок в 3.4 раза.

Установлено, что взрывные работы на шахте “Магнезитовая” ПАО “Комбинат Магнезит” при веерной скважинной отбойке выполнены с обеспечением безопасности сейсмического воздействия подземного технологического взрыва и не приведут к потере устойчивости горного массива около подземных выработок.

Авторы выражают признательность за помощь в проведении исследований А. С. Флягину и С. С. Таранжину.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Shchelkanov V. A. and Mironov P. S.** Influence of mass explosions on the stability of underground workings in the combined development of iron ore deposits, Drilling and blasting operations at ore pits, Proceedings IM MISI USSR, 1972, no. 36, pp. 91–97. [Щелканов В. А., Миронов П. С. Влияние массовых взрывов на устойчивость подземных выработок при комбинированной разработке железорудных месторождений // Буровзрывные работы на рудных карьерах: труды ИГД МЧМ СССР. — 1972. — Вып. 36. — С. 91–97.]
2. **Kartuzov M. I. and Pazdnikov N. V.** Prediction of seismic safety of underground workings in case of explosions, Sverdlovsk, IM MISI USSR, 1982. (in Russian) [Картузов М. И., Паздников Н. В. Прогнозирование сейсмобезопасности подземных выработок при взрывах. — Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1982. — Вып. 68. — 79 с.]
3. **Kartuzov M. I., and Pazdnikov N. V.** Methods of providing seismic technology of blasting, Sverdlovsk, IM MISI USSR, 1984. (in Russian) [Картузов М. И., Паздников Н. В. Методика обеспечения сейсмобезопасной технологии ведения взрывных работ. — Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1984. — 12 с.]
4. **Distribution** and correlation of indicators of physical properties of rocks, Moscow, Nedra, 1981. (in Russian) [Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород. — М.: Недра, 1981. — 192 с.]
5. **Handbook** (Cadastre) on Physical Properties of Rocks, Moscow, Nedra, 1975. (in Russian) [Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. — М.: Недра, 1975. — 279 с.]
6. **Rzhevsky V. V. and Novik G. Ya.** Fundamentals of rock physics, Moscow, Nedra, 1984. (in Russian) [Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. — М.: Недра, 1984. — 359 с.]
7. **Rzhevsky V. V.** Physical and technical parameters of rocks, Moscow, Nauka, 1975. (in Russian) [Ржевский В. В. Физико-технические параметры горных пород. — М.: Наука, 1975. — 212 с.]
8. **Minerals.** Reference book, Moscow, AS USSR, 1960–1992. (in Russian) [Минералы. Справочник. — М.: АН СССР, 1960–1992.]

9. **Physical properties** of rocks and minerals (petrophysics). Handbook of Geophysics, Moscow, Nedra, 1984, 455 pp. (in Russian) [**Физические свойства** горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. — М.: Недра, 1984. — 455 с.]
10. **Drukovanuy M. F.** Control methods explosion in the pits, Moscow, Nedra, 1973. (in Russian) [**Друкवानый М. Ф.** Методы управления взрывом на карьерах. — М.: Недра, 1973. — 415 с.]
11. **Kutuev V. A.** Investigating the seismic impact made by the underground large-scale blast on the secure facilities of Kyshtym GOK when caving the floor pillar, News of the Higher Institutions. Mining Journal, 2020, no. 2, pp. 25–36. [**Кутуев В. А.** Исследование сейсмического воздействия подземного массового взрыва на охраняемые объекты Кыштымского ГОКа при обрушении межэтажного целика // Изв. вузов. Горный журнал. — 2020. — № 2. — С. 25–36.]
12. **Kutuev V. A., Zharikov S. N.** The effect of blasting on a high-pressure gas pipeline located within the borders of a mine take, News of the Higher Institutions. Mining Journal, 2020, no. 3, pp. 50–60. [**Кутуев В. А., Жариков С. Н.** Влияние взрывных работ на газопровод высокого давления расположенного в границах горного отвода // Известия вузов. Горный журнал. — 2020. — № 3. — С. 50–60.]
13. **Kutuev V. A. and Zharikov S. N.** Influence of underground mass explosion on protected objects of the industrial site in case of collapse of the interstory whole, Mining Information Analysis Bulletin, 2020, vol. 1, no. 3, pp. 368–382. [**Кутуев В. А., Жариков С. Н.** Влияние подземного массового взрыва на охраняемые объекты промплощадки при обрушении межэтажного целика // ГИАБ. — 2020. — Т. 1. — № 3. — С. 380–394.]
14. **Zharikov S. N. and Kutuev V. A.** Results of experimental studies of the dynamic action of an explosion on the limit contour of the Jetygarinsky field quarry, Problems of subsurface use, 2019, no. 2 (21), pp. 20–26. [**Жариков С. Н., Кутуев В. А.** Результаты экспериментальных исследований динамического действия взрыва на предельном контуре карьера Джетыгаринского месторождения // Проблемы недропользования. — 2019. — № 2 (21). — С. 20–26.