

УДК 622.235.535.2

Кутуев Вячеслав Александрович

научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075 г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: 9634447996@mail.ru

Князев Денис Юрьевич

младший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: knyazev@igduran.ru

Жариков Сергей Николаевич

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: 333vista@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ
НА ОХРАНЯЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ
ОТ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ В КАРЬЕРЕ
АО «ТОМИНСКИЙ ГОК» ***

Аннотация:

Представлены результаты оценки влияния взрывных работ при разработке карьера АО «Томинский ГОК» на охраняемые объекты, находящиеся на территории горного отвода карьера и в близлежащих населенных пунктах. При проведении исследований применялись интерпретация, анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований, включающих методы многоканальной регистрации механических колебаний грунта трехканальными сейсморегистраторами посредством аналого-цифрового преобразования входных сигналов напряжения, а также методы натурного и производственного эксперимента. Для натурных исследований использовались сейсморегистраторы как отечественного производства – УРАН, так и аналоги зарубежного производства – Minimate Plus. Всего было проведено две серии измерений сейсмических колебаний и ударной воздушной волны, включающие регистрацию от трех до пяти последовательных взрывов в смену с массой взрывчатых веществ (ВВ) до 50 т на взрывной блок. Для выполнения двух серий измерений воздействия негативных факторов взрывных работ исследуемая территория была условно разделена на две зоны воздействия: 1 – ближняя зона, находящаяся у пунктов оцепления опасной зоны взрывных работ (в среднем на расстоянии 1 км от взрываемых блоков); 2 – дальняя зона, вклю-

DOI: 10.25635/2313-1586.2022.02.069

Kutuev Vyacheslav A.

Researcher,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: 9634447996@mail.ru

Knyazev Denis Y.

Junior Researcher,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: knyazev@igduran.ru

Zharikov Sergey N.

Candidate of Technical Sciences,
Leading Researcher, Head of laboratory,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: 333vista@mail.ru.

**RESEARCH OF THE INFLUENCE
OF DYNAMIC LOAD ON PROTECTED
OBJECTS FROM BLASTING
OPERATIONS IN THE QUARRY
OF JSC «TOMINSKY MPP»**

Abstract:

The article presents the results of the assessment of the impact of blasting operations during the development of the JSC "Tominsky MPP" on protected objects located on the territory of the mining branch of the quarry and in nearby settlements. During the research, the analysis and generalization of theoretical and experimental studies were used, including methods of multi-channel recording of mechanical vibrations of the soil by three-channel seismic recorders through analog-to-digital conversion of voltage input signals, as well as methods of field and production experiments. For field studies, seismic recorders were used, both of domestic production – URAN, and analogues of foreign production – Minimate Plus. In total, two series of measurements of seismic vibrations and shock air waves were carried out, including the registration of three to five explosions per shift with a mass of explosives up to 50 tons per explosive unit. To perform two series of measurements of the impact of negative factors of blasting, the studied area was conditionally divided into two impact zones: 1 – the nearest zone located at the points of the cordon of the hazardous area of blasting (on average at a distance of 1 km from the exploding blocks); 2 – the far zone, including the territory of the nearest settlements (near objects with an outraged population). As a result of the conducted research, the following have been established: features of the propagation of wave processes in a

* Исследования выполнены в рамках Государственного задания №075-00412-22 ПР, тема 1 (2022-2024), (FUWE-2022-0005), рег. №1021062010531-8-1.5.1, а также при дополнительном привлечении хозяйственных средств.

чающая территорию ближайших населенных пунктов (возле объектов, где население недо-вольно сейсмическим воздействием взрывных работ на горнодобывающем предприятии). В результате проведенных исследований уста-новлены особенности распространения волно-вых процессов в сложноструктурном массиве горных пород на основе натурных измерений; значения допустимых скоростей сейсмических колебаний; рациональные параметры буровзрывных работ (БВР), обеспечивающие сей-смические колебания и давление на фронте ударной воздушной волны (УВВ) в пределах до-пустимых величин при разработке месторож-дения в направлении охраняемых объектов.

Ключевые слова: сейсмическое действие взры-ва, взрывные работы, разрушение горных по-род, свойства горных пород, воздействие удар-ной воздушной волны, сейсмобезопасные пара-метры БВР, безопасные расстояния.

complex-structured rock mass based on field meas-urements; values of permissible seismic vibration rates; rational parameters of drilling and blasting operations, providing seismic vibrations and pres-sure at the front of the shock air wave within ac-ceptable values, when developing a field in the direction of protected objects.

Key words: seismic effect of explosion, blasting, destruction of rocks, properties of rocks, impact of shock air wave, earthquake-safe parameters of drilling and blasting, safe distances.

Введение

Вопрос обеспечения сейсмобезопасности при ведении буровзрывных работ на горных предприятиях включает две основные задачи, решения которых имеют суще-ственные отличия. Это обеспечение, во-первых, сейсмической устойчивости массива горных пород и насыпных сооружений, а во-вторых, устойчивости объектов на поверх-ности. Допустимые скорости колебаний до потери устойчивости в обоих случаях раз-ные. В случае, когда массив сохранит устойчивость, здание может получить поврежде-ния конструктивных элементов, вплоть до частичного или полного обрушения. Поэто-му при оценке сейсмического влияния необходимо учитывать данный фактор. В статье представлено описание соответствующих результатов исследований в условиях Томин-ского месторождения медно-порфировых руд.

Проблематика и основание для проведения исследований заключается в том, что расположение населенных пунктов с охраняемыми объектами находится в непосред-ственной близости к карьере АО «Томинский ГОК».

Объектами исследования являются:

- массив горных пород карьера АО «Томинский ГОК»;
- охраняемые объекты территории горного отвода АО «Томинский ГОК» и близлежащих населенных пунктов.

Предмет исследования – влияние взрывных работ, проводимых в карьере АО «Томинский ГОК», на сейсмоустойчивость охраняемых объектов.

Целью работы является повышение уровня сейсмической безопасности и мини-мизация давления на фронте УВВ от взрывных работ в условиях карьера АО «Томинский ГОК» и установление ограничений по воздействию горных работ в направлении охраняемых объектов.

Задачи исследования:

1. Определить допустимые скорости сейсмических колебаний в зоне располо-жения охраняемых объектов, при которых сохраняется их безопасная эксплуатация.
2. Определить параметры БВР, обеспечивающие сейсмические колебания в пре-делах допустимых величин.
3. Установить особенности распространения волновых процессов в сложност-руктурном массиве горных пород на основе натурных измерений.
4. Разработать рекомендации по предупреждению сейсмической опасности и воздействия УВВ, исключаяющие повреждение охраняемых объектов при производстве взрывных работ в карьере.

Методы, используемые при проведении исследований:

- интерпретация, анализ и обобщение теоретических и экспериментальных исследований, включающих методы многоканальной регистрации механических колебаний грунта трехканальными сейсморегистраторами посредством аналого-цифрового преобразования входных сигналов напряжения;
- методы натурального (производственного) эксперимента.

Методика исследований

Для изучения динамики процесса и выполнения комплексного расчета сейсмостойчивости массива и определения допустимых значений скорости колебаний для охраняемых объектов использованы методические разработки Института горного дела УрО РАН [1 – 5], а также учтен мировой опыт исследований по прогнозированию колебаний грунта при ведении взрывных работ [6 – 10]. Наглядно порядок исследований представлен на рис. 1.



Рис. 1. Методика исследований сейсмического действия взрыва

Методика измерений

Исследования сейсмобезопасности и воздействия УВВ производились по методике измерений скорости сейсмических колебаний и давления на фронте ударной воздушной волны с использованием цифровых сейсморегистраторов MiniMate Plus и УРАН [11].

Измерения сейсмических колебаний осуществлялись тремя сейсморегистраторами УРАН (ООО «Горизонт», Россия, г. Екатеринбург) с сейсмоприемниками GS-20, устанавливаемыми в грунт и ориентированными по трем направлениям относительно взрыва (рис. 2 а), и цифровым сейсморегистратором MiniMate Plus («Instantel», Канада, г. Онтарио) с трехкомпонентным сейсмоприемником «Series III Standard Transducer». Давление на фронте УВВ зафиксировано также при помощи цифрового сейсморегистратора MiniMate Plus с использованием линейного микрофона «Series III L Microphone» (рис. 2 б).



а



б

Рис. 2. Измеритель и регистратор аналоговых напряжений:
а - УРАН; б - цифровой сейсморегистратор MiniMate Plus

Расчет сейсмостойчивости грунтов при взрывах в карьере

По данным инженерно-геологических изысканий на территории карьера Томинского ГОКа выделено 12 типов пород. Рыхлые осадочные грунты (почвенно-растительный слой, суглинки, глина, щебенисто-глинистая кора выветривания, щебнистая кора выветривания) мы объединили в одну категорию пород, поэтому расчет допустимых значений скоростей колебаний грунта был произведен для 7-ми типов пород (см. рис. 1), в соответствии с методикой [12]. Исходные данные по физико-механическим свойствам пород взяты из технических отчетов о результатах инженерно-геологических изысканий АО «Томинский ГОК», а полученные расчетные значения сейсмостойчивости грунтов представлены на рис. 3.

На основании исходных данных выполнен расчет и произведено сравнение расчетных допустимых скоростей колебаний грунтов с допустимыми значениями скоростей колебаний конструкций (охраняемых объектов), соответствующих сейсмичности района строительства, которая, согласно [13], для сейсмической активности 5 баллов составляет $v_d = 0,03$ м/с (отмечено на рис. 3 пунктирной линией). Как видно из рис. 3, расчетные допустимые скорости по условию сейсмостойчивости превышают указанное значение в большинстве случаев, что свидетельствует о значительном запасе сейсмостойчивости диоритов, базальтоидов и метасоматитов.

Кратчайшие расстояния от карьера до охраняемых объектов представлены на рис. 4.

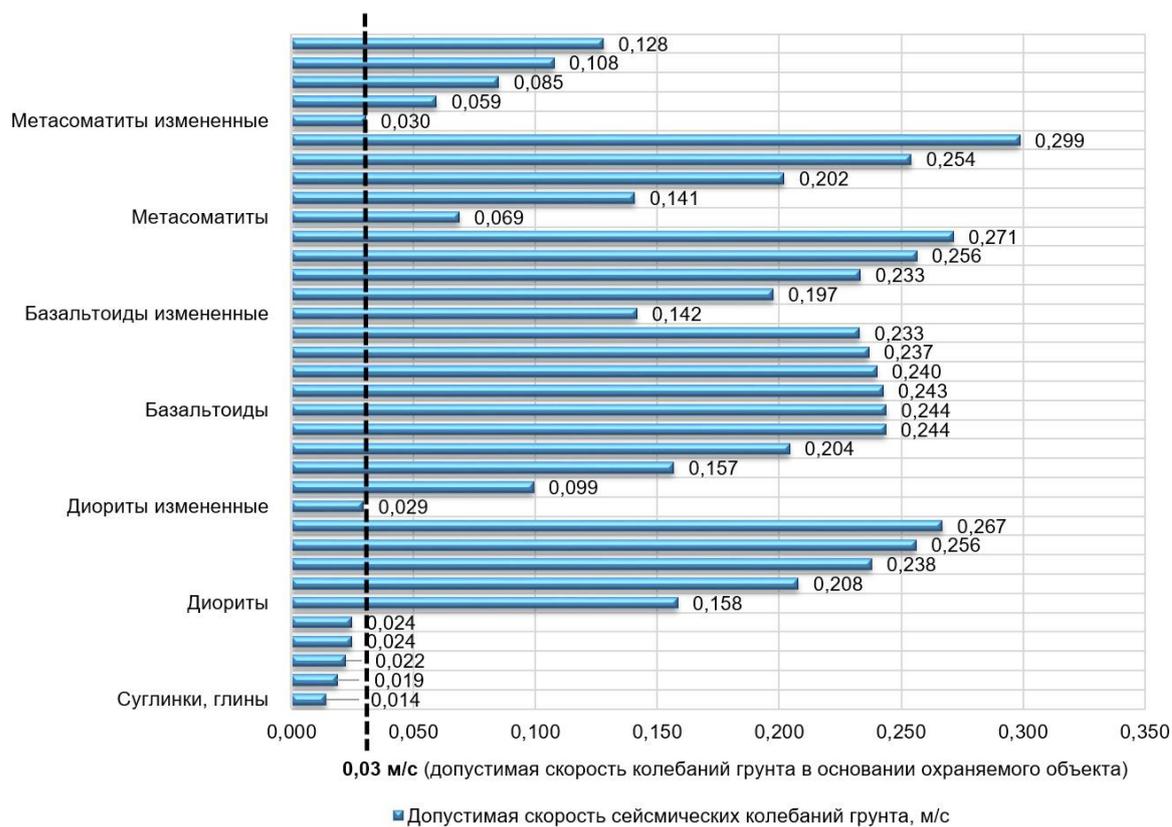


Рис. 3. Расчетные значения сейсмоустойчивости горных пород Томинского месторождения медно-порфировых руд

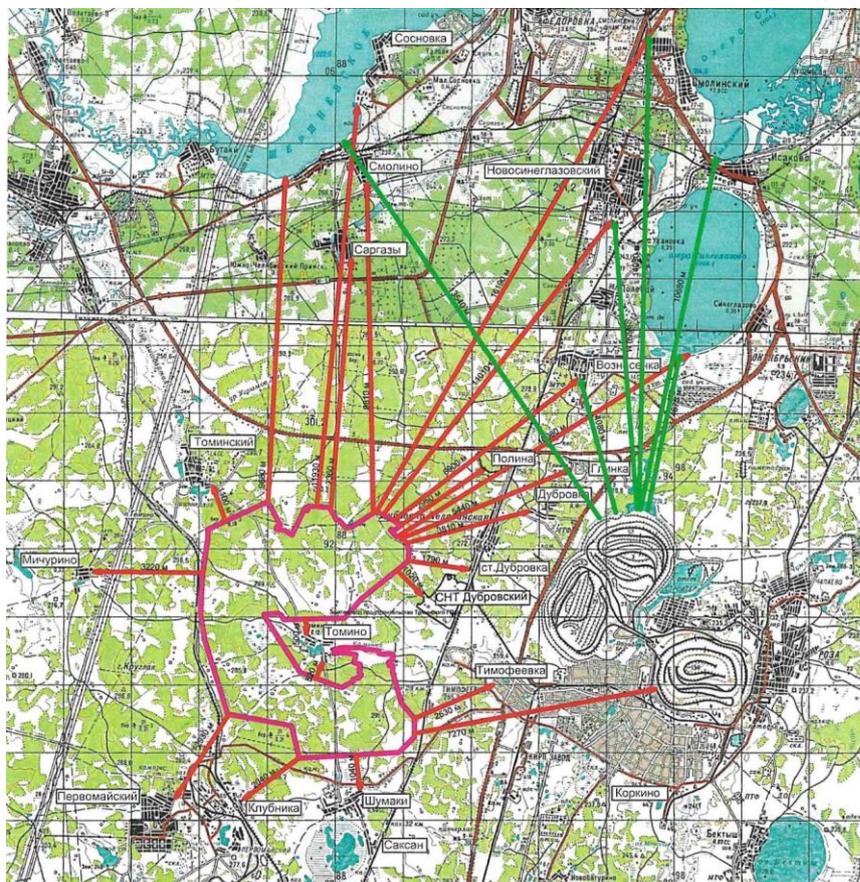


Рис. 4. Кратчайшие расстояния (красные стрелки) от границы карьера до охраняемых объектов в близлежащих населенных пунктах

Согласно расстояниям между карьером и охраняемыми объектами, допустимой скорости колебаний грунта в основании охраняемых объектов (зданий), при среднем коэффициенте грунтовых условий $K=450$ были произведены расчеты допустимых значений колебаний грунта (табл. 1) для зданий второго ($v_d=0,016$ м/с) и третьего ($v_d=0,028$ м/с) классов [11, 14], что соответствует нормальному уровню зданий согласно «Техническому регламенту о безопасности зданий и сооружений» № 384-ФЗ [15].

Таблица 1

Расчетные значения опасной массы ВВ на ступень замедления для охраняемых объектов, расположенных в близлежащих населенных пунктах

Населенный пункт с охраняемыми объектами	Кратчайшее расстояние от карьера до охраняемого объекта L , м	Средний коэффициент грунтовых условий K	Класс здания (охраняемого объекта) [11, 14]	Допустимая скорость колебаний грунта в основании охраняемого объекта v_d , м/с	Опасная масса ВВ (на ступень замедления) для охраняемого объекта Q , кг
д. Томино	500	450	II	0,016	1580
			III	0,028	4840
снт Дубровский	1020		II	0,016	13416
			III	0,028	41086
д. Шумаки	1040		II	0,016	14221
			III	0,028	43550
п. Томинский	1100		II	0,016	16826
			III	0,028	51531
ж/д ст. Дубровка	1790		II	0,016	72506
			III	0,028	222050
ж/д ст. Клубника	2040		II	0,016	107326
			III	0,028	328686
п. Тимофеевка	2530		II	0,016	204728
			III	0,028	626978
п. Первомайский	2930		II	0,016	317993
			III	0,028	973854
п. Полина	2950		II	0,016	324550
			III	0,028	993933
д. Мичурино	3220		II	0,016	422068
			III	0,028	1292584
п. Дубровка	3810	II	0,016	699181	
		III	0,028	2141243	
д. Глинка	5440	II	0,016	2035221	
		III	0,028	6232865	
с. Вознесенка	6900	II	0,016	4153003	
		III	0,028	12718571	
г. Коркино	7270	II	0,016	4857560	
		III	0,028	14876277	
п. Саргазы	7360	II	0,016	5040207	
		III	0,028	15435634	
п. Смолино	9810	II	0,016	11934987	
		III	0,028	36550898	

Определение безопасных расстояний

Для условий карьера АО «Томинский ГОК» в соответствии с методикой исследований (см. рис. 1) произведен многовариантный расчет по определению допустимых расстояний от карьера до охраняемого объекта для зданий II и III класса в зависимости от массы ВВ в ступени замедления, коэффициента грунтовых условий и допустимой скорости колебаний в основании зданий (охраняемых объектов). Результаты расчета сведены в табл. 2.

Таблица 2

Допустимые расстояния в плане от границы карьера до охраняемых объектов

Условие		2-й класс здания	3-й класс здания
		Допустимая скорость колебаний грунта в основании здания v_d , м/с	
		0,016	0,028
Масса ВВ в ступени Q , кг	Коэффициент грунтовых условий K , ед.	Допустимое расстояние R , м	
150	300	173	119
	450	227	156
	600	275	189
200	300	191	131
	450	250	172
	600	302	208
250	300	205	141
	450	269	185
	600	326	224
300	300	218	150
	450	286	197
	600	346	238
350	300	230	158
	450	301	207
	600	364	251
400	300	240	165
	450	314	217
	600	381	262
450	300	250	172
	450	327	225
	600	396	273
500	300	259	178
	450	339	233
	600	410	283

Для определения безопасных расстояний непосредственно от границы взрывных работ до охраняемого объекта в зависимости от угла борта карьера АО «Томинский ГОК» и глубины производства взрывных работ в карьере предлагается следующее выражение:

$$L_{H(x)} = R + \sqrt{(H_{\text{взр}(x)} / \sin(\alpha))^2 - H_{\text{взр}(x)}^2}, \text{ м}, \quad (1)$$

где $L_{H(x)}$ – безопасное расстояние до охраняемого объекта при глубине $H_{\text{взр}(x)}$;
 R – допустимое расстояние от границы карьера до охраняемого объекта (см. табл. 2);
 $H_{\text{взр}(x)}$ – глубина производства взрывных работ в карьере;
 α – угол борта карьера.

В качестве примера рассмотрен вариант со следующими параметрами: масса ВВ $Q = 450$ кг; здание 2-го класса; допустимое расстояние $R = 327$ м (см. табл. 2); глубина проведения взрывных работ в карьере $H_{\text{взр}}(x) = 50$ м; угол борта карьера $\alpha = 60^\circ$. Подставив исходные данные в формулу (1), получим значение безопасного расстояния до охраняемого объекта $L_H = 327 + \sqrt{(50/\sin(60^\circ))^2 - 50^2} = 355,8$ м.

Для наглядности на рис. 5 представлена схема по определению безопасных расстояний от границы взрывных работ до охраняемого объекта.

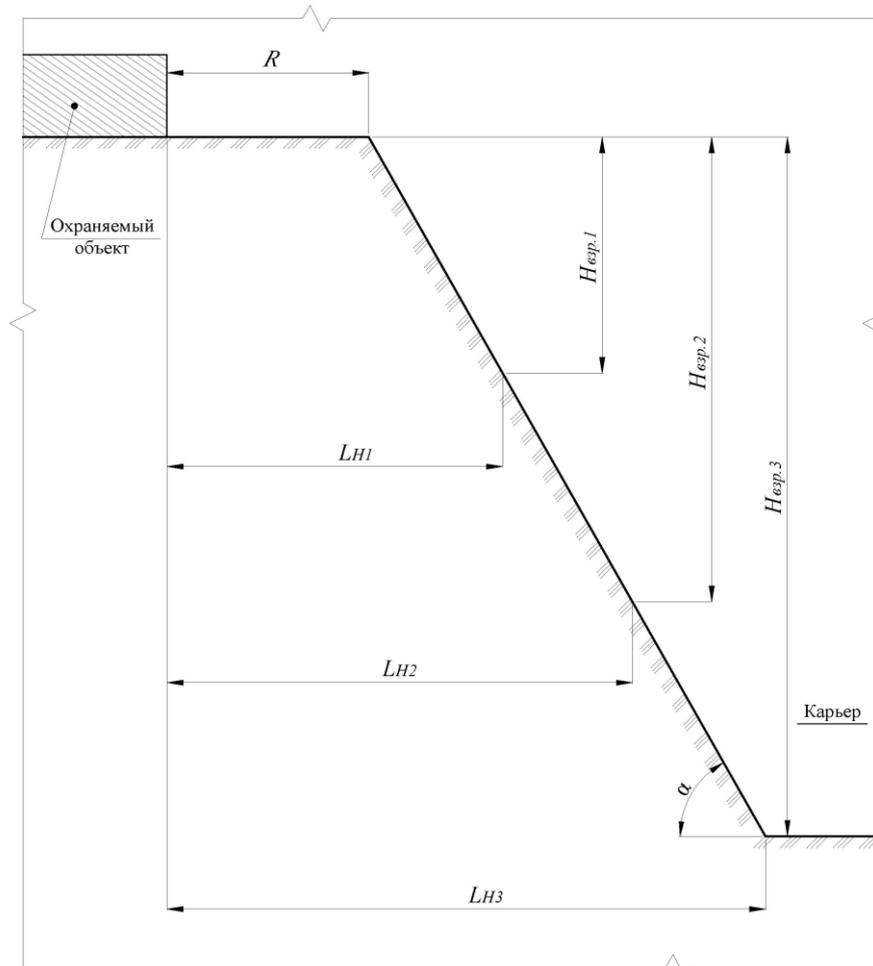


Рис. 5. Схема по определению безопасных расстояний согласно (1)

Результаты натурных измерений

В ходе натурных исследований проведено три серии измерений, включающих регистрацию от трех до пяти взрывов в смену с массой ВВ до 50 т на блок.

Для выполнения двух серий измерений воздействия негативных факторов взрывных работ исследуемая территория была условно разделена на 2 зоны: 1 - ближняя зона, находящаяся у пунктов оцепления опасной зоны взрывных работ, в среднем на расстоянии 1 км от взрываемых блоков (рис. 6); 2 - дальняя зона, включающая территорию ближайших населенных пунктов (возле охраняемых объектов с населением, которое недовольно сейсмическим воздействием взрывных работ на горнодобывающем предприятии). Как и предполагалось, волновые процессы не распространились на расстояния более 1500 м от границы ведения взрывных работ до охраняемых объектов, расположенных в ближайших населенных пунктах, соответственно, измерительная аппаратура зафиксировала динамические напряжения только в ближней зоне (табл. 3) в диапазоне расстояний $466 \div 1500$ м.

Таблица 3

Результаты измерений волновых процессов (ближняя зона)

Место регистрации	Сейсморегистратор	Место взрыва	Давление на фронте УВВ, Па (дБ)		Скорость сейсмических колебаний, см/с		Масса ВВ на ступень замедления, кг	Расстояние от места взрыва до места замера, м
			Фактическое (измеренное)	Допустимое	Фактическая (измеренная)	Допустимая		
I взрыв								
Пост оцепления №2	УРАН	Массовый взрыв блока 1251-190	–	250	0*	3,0	463	809,66
Пост оцепления №4	УРАН		–		0*			866,35
Пост оцепления №6	MiniMate Plus		8,75 (112,8)		0,105			885,24
Пост оцепления №8	УРАН		–		0*			1093,28
II взрыв								
Пост оцепления №2	УРАН	Массовый взрыв блока 1250-190	–	250	0*	3,0	436	1091,56
Пост оцепления №4	УРАН		–		0,090			688,69
Пост оцепления №6	MiniMate Plus		8,50 (112,6)		0,184			652,18
Пост оцепления №8	УРАН		–		0*			1267,32
III взрыв								
Пост оцепления №2	УРАН	Массовый взрыв блока 1248-220	–	250	0*	3,0	210	1168,52
Пост оцепления №4	УРАН		–		0,130			553,96
Пост оцепления №6	MiniMate Plus		12,8 (116,1)		0,200			466,38
Пост оцепления №8	УРАН		–		0,010			1434,56
IV взрыв								
Пост оцепления №2	УРАН	Массовый взрыв блока 1249-205	–	250	0,050	3,0	456	690,31
Пост оцепления №4	УРАН		–		0,070			591,93
Пост оцепления №6	MiniMate Plus		9,75 (113,7)		0,099			960,31
Пост оцепления №8	УРАН		–		0*			1339,16
V взрыв								
Пост оцепления №2	УРАН	Массовый взрыв блока 1252-190	–	250	0*	3,0	425	982,29
Пост оцепления №4	УРАН		–		0*			890,91
Пост оцепления №6	MiniMate Plus		6,50 (110,2)		0,103			727,32
Пост оцепления №8	УРАН		–		0*			1067,12
VI взрыв								
Пост охраны №2	УРАН	Массовый взрыв блока 1260-190	–	250	0*	3,0	432	1936,77
возле д. Томино	УРАН		–		0*	1,6		3549,13
АБК (фабрика)	MiniMate Plus		5,25 (108,4)		0,096	1,6		1489,03
Водосборник №2	УРАН		–		0*	3,0		1838,17

0* – фактическая скорость колебаний грунта отсутствовала или была ниже порога чувствительности датчиков.

• п. Первомайский	317 993 кг
• п. Полина	324 550 кг
• д. Мичурино	422 068 кг
• п. Дубровка	699 181 кг
• д. Глинка	2 035 221 кг
• с. Вознесенка	4 153 003 кг
• г. Коркино	4 857 560 кг
• п. Саргазы	5 040 207 кг
• п. Смолино	11 934 987 кг

2. Согласно проанализированным проектам массовых взрывов, в карьере производятся взрывные работы на технологических блоках в объеме до 150 скважин с общей массой ВВ до 50 т. При большом количестве скважин возможно случайное совпадение одновременного срабатывания разных ступеней замедления, что фактически может увеличить общую массу в ступени и вызвать увеличенные колебания. Поэтому рекомендуется при взрывах проектировать схему инициирования зарядов с массой в ступени замедления (Q) менее 1 т. При замедлении каждой скважины с массой заряда $Q = 450$ кг при расстоянии (L_H) более 360 м от места взрыва до охраняемого объекта потеря сейсмостойчивости грунта маловероятна. При этом следует отметить, что во избежание повышенных межблочных подвижек горного массива не рекомендуется увеличивать количество скважин во взрываемом блоке более чем в два раза.

3. Для решения задачи по определению безопасных расстояний от места проведения взрывных работ в карьере до охраняемого объекта предложена соответствующая расчетная схема (табл. 2 и (1), позволяющие определять безопасные расстояния до охраняемого объекта от любой точки в карьерах АО «Томинский ГОК» по глубине).

4. Для остекления объектов на земной поверхности опасное избыточное давление на фронте УВВ составляет более 250 Па [16]. Также известно, что стекла толщиной 0,002 – 0,003 м разрушаются при избыточном давлении 600 – 1800 Па [17]. При проведении взрывных работ на карьере АО «Томинский ГОК» зарегистрированное максимальное давление на фронте УВВ возле поста оцепления № 6 составило 12,8 Па, что меньше допустимого избыточного давления в 19,5 раз.

В результате исследований воздействия взрывных работ в условиях карьера АО «Томинский ГОК» превышений допустимых значений сейсмических колебаний и давления на фронте УВВ не выявлено, что говорит о полном соблюдении ФНиП «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения» [18] и проектов массовых взрывов подрядной организацией ООО «Современные горные технологии» [19].

Список литературы

1. Бондаренко И.Ф., Жариков С.Н., Зырянов И.В., Шеменев В.Г., 2017. *Буровзрывные работы на кимберлитовых карьерах Якутии*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 172 с.
2. Жариков С.Н., Кутуев В.А., 2020. Анализ сейсмического эффекта в различных породах и грунтовых условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 12, С. 44 - 53. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-44-53>.
3. Жариков С.Н., Берсенев Г.П., Кутуев В.А., Флягин А.С., 2019. Научные исследования сейсмического действия взрыва на подземный газопровод высокого давле-

ния. *Проблемы недропользования*, № 3, С. 145 - 154. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.03.145>.

4. Zharikov S., Kutuev V., 2019. About Order of Comprehensive Solving the Seismic and Pre-Splitting Issues for Drill-and-Blasting Open-Pits. *Trigger Effects in Geosystems. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*, Springer, Cham, P. 437 - 445. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_46.

5. Kutuev V.A., 2020. 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*, V. 2, P. 25 - 36. <https://doi.org/10.21440/05361028-2020-2-25-36>.

6. Zeng, J., Mohammed, A. S., Mirzaei, F., Moosavi, S. M. H., Armaghani, D. J., Samui, P., 2022. A parametric study of ground vibration induced by quarry blasting: an application of group method of data handling. *Environmental Earth Sciences*, V. 81 (4), art. no. 127, <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10239-6>.

7. Armaghani, D. J., Momeni, E., Asteris, P., 2020. Application of group method of data handling technique in assessing deformation of rock mass. *Metaheuristic Comput Appl*, V. 1 (1), P. 1 - 18. <https://doi.org/10.12989/mca.2020.1.1.001>.

8. Amiri, M., Hasanipanah, M., Bakhshandeh, A. H., 2020. Predicting ground vibration induced by rock blasting using a novel hybrid of neural network and itemset mining. *Neural Computing and Applications*, V. 32, P. 14681 - 14699. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04822-w>.

9. Armaghani, D. J., Mahdiyar, A., Hasanipanah, M., Faradonbeh, R. S., Khandelwal, M., Amnieh, H. B., 2016. Risk Assessment and Prediction of Flyrock Distance by Combined Multiple Regression Analysis and Monte Carlo Simulation of Quarry Blasting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, V. 49 (9), P. 3631 - 3641. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1015-z>.

10. Jahed Armaghani, D., Kumar, D., Samui, P., Hasanipanah, M., Roy B., 2021. A novel approach for forecasting of ground vibrations resulting from blasting: modified particle swarm optimization coupled extreme learning machine. *Engineering with Computers*, V. 37 (4), P. 3221 - 3235. <https://doi.org/10.1007/s00366-020-00997-x>.

11. *Методика измерений скорости сейсмических колебаний и давления на фронте ударной воздушной волны с использованием цифрового сейморегистратора MINIMATE PLUS: устройства регистрации и анализа УРАН и автономного измерителя-регистратора АИР*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН; № 88-16359-118-01.00076-2011, 2011, 15 с.

12. Каргузов М.И., Паздников Н.В. и др., 1984. *Методика обеспечения сейсмобезопасной технологии ведения взрывных работ*. Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 12 с.

13. Друкованый М.Ф., 1973. *Методы управления взрывом на карьерах*. Москва: Недра, 415 с.

14. *Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия*. РБ Г-05-039-96: утверждено Постановлением Госатомнадзора России 31 декабря 1996 № 100: введено в действие с 01 августа 1997. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200061429> (дата обращения: 01.04.2022).

15. *Технический регламент о безопасности зданий и сооружений (с изменениями на 2 июля 2013 года)*: утверждено Государственной Думой Федерального Собрания Российской Федерации 30 декабря 2009 № 384-ФЗ. (Федеральный закон). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902192610?section=text> (дата обращения: 01.04.2022).

16. Богацкий В.Ф., Фридман А.Г., 1982. *Охрана инженерных сооружений и окружающей среды от вредного действия промышленных взрывов*. Москва: Недра, 162 с.

17. *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.

18. *Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения: в редакции Приказа Ростехнадзора от 03.12.2020 № 494.* (Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности). URL: <http://docs.cntd.ru/document/573219717> (дата обращения: 01.04.2022).

19. ООО «Современные горные технологии». URL: <https://s-g-t.ru/> (дата обращения: 01.04.2022).

References

1. Bondarenko I.F., Zharikov S.N., Zyryanov I.V., Shemenov V.G., 2017. Burovzryvnye raboty na kimberlitovykh kar'erakh Yakutii [Drilling and blasting operations at the kimberlite quarries of Yakutia]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 172 p.

2. Zharikov S.N., Kutuev V.A., 2020. Analiz seismicheskogo effekta v razlichnykh porodakh i gruntovykh usloviyakh [Analysis of the seismic effect in various rocks and ground conditions]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 12, P. 44 - 53. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-44-53>.

3. Zharikov S.N., Bersenev G.P., Kutuev V.A., Flyagin A.S., 2019. Nauchnye issledovaniya seismicheskogo deistviya vzryva na podzemnyi gazoprovod vysokogo davleniya . [Scientific studies of the seismic effect of an explosion on an underground high-pressure gas pipeline]. Problemy nedropol'zovaniya, № 3, S. 145 - 154. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.03.145>.

4. Zharikov S., Kutuev V., 2019. About Order of Comprehensive Solving the Seismic and Pre-Splitting Issues for Drill-and-Blasting Open-Pits. *Trigger Effects in Geosystems. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*, Springer, Cham, P. 437 - 445. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_46.

5. Kutuev V.A., 2020. 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*, V. 2, P. 25 - 36. <https://doi.org/10.21440/05361028-2020-2-25-36>.

6. Zeng, J., Mohammed, A. S., Mirzaei, F., Moosavi, S. M. H., Armaghani, D. J., Samui, P., 2022. A parametric study of ground vibration induced by quarry blasting: an application of group method of data handling. *Environmental Earth Sciences*, V. 81 (4), art. no. 127, <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10239-6>.

7. Armaghani, D. J., Momeni, E., Asteris, P., 2020. Application of group method of data handling technique in assessing deformation of rock mass. *Metaheuristic Comput Appl*, V. 1 (1), P. 1 - 18. <https://doi.org/10.12989/mca.2020.1.1.001>.

8. Amiri, M., Hasanipanah, M., Bakhshandeh, A. H., 2020. Predicting ground vibration induced by rock blasting using a novel hybrid of neural network and itemset mining. *Neural Computing and Applications*, V. 32, P. 14681 - 14699. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04822-w>.

9. Armaghani, D. J., Mahdiyari, A., Hasanipanah, M., Faradonbeh, R. S., Khandelwal, M., Amnieh, H. B., 2016. Risk Assessment and Prediction of Flyrock Distance by Combined Multiple Regression Analysis and Monte Carlo Simulation of Quarry Blasting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, V. 49 (9), P. 3631 - 3641. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1015-z>.

10. Jahed Armaghani, D., Kumar, D., Samui, P., Hasanipanah, M., Roy, B., 2021. A novel approach for forecasting of ground vibrations resulting from blasting: modified particle swarm optimization coupled extreme learning machine. *Engineering with Computers*, V. 37 (4), P. 3221 - 3235. <https://doi.org/10.1007/s00366-020-00997-x>.

11. Metodika izmerenii skorosti seismicheskikh kolebanii i davleniya na fronte udarnoi vozduшной volny s ispol'zovaniem tsifrovogo seimoregistratora MINIMATE PLUS:

ustroistva registratsii i analiza URAN i avtonomnogo izmeritelya-registratora AIR [Methodology of measuring the speed of seismic vibrations and pressure on the front of the shock air-wave using the MINIMATE PLUS digital seismic recorder: a device for recording and analyzing URAN and an autonomous measuring recording device AIR]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN; № 88-16359-118-01.00076-2011, 2011, 15 p.

12. Kartuzov M.I., Pazdnikov N.V. i dr., 1984. Metodika obespecheniya seismo-bezopasnoi tekhnologii vedeniya vzryvnykh rabot [Methodology for ensuring seismic-safe technology of blasting operations]. Sverdlovsk: IGD MChM SSSR, 12 p.

13. Drukovanyi M.F., 1973. Metody upravleniya vzryvom na kar'erakh [Methods of explosion control at quarries]. Moscow: Nedra, 415 p.

14. Rukovodstvo po analizu opasnosti avariinykh vzryvov i opredeleniyu parametrov ikh mekhanicheskogo deistviya [Guidelines for analyzing the hazard rate of accidental detonations and for determining the parameters of their mechanical action]. RB G-05-039-96: utverzhdeno Postanovleniem Gosa-tomnadzora Rossii 31 dekabrya 1996 № 100: vvedeno v deistvie s 01 avgusta 1997 . URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200061429> (data obrashcheniya: 01.04.2022).

15. Tekhnicheskii reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenii (s izmeneniyami na 2 iyulya 2013 goda): utverzhdeno Gosudarstvennoi Dumoi Federal'nogo Sobraniya Rossiiskoi Federatsii 30 dekabrya 2009 № 384-FZ. (Federal'nyi zakon) [Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures (as amended on July 2, 2013): approved by the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation on December 30, 2009 No. 384-FZ. (Federal law)]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902192610?section=text> (data obrashcheniya: 01.04.2022).

16. Bogatskii V.F., Fridman A.G., 1982. Okhrana inzhenernykh sooruzhenii i okruzhayushchei sredy ot vrednogo deistviya promyshlennykh vzryvov [Protection of engineering structures and the environment from the harmful effects of industrial explosions]. Moscow: Nedra, 162 p.

17. Razrabotka seismo-bezopasnoi tekhnologii vedeniya vzryvnykh rabot na Mel'nichno-Palenikhinskom kar'ere kombinata "Magnezit": otchet o NIR [Development of earthquake-safe technology for conducting blasting operations at the Melnichno-Palenikhinsky quarry of the Magnezit combine: research report]. IGD MChM SSSR; ruk. M.I. Kartuzov . № GR 0189.0075784. Inv. № 02910009098. Sverdlovsk, 1990, 54 p.

18. Pravila bezopasnosti pri proizvodstve, khranении i primenении vzryvcha-tykh materialov promyshlennogo naznacheniya: v redaktsii Prikaza Rostekhnadzora ot 03.12.2020 № 494. (Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti) . [Safety rules for the production, storage and use of explosive materials for industrial purposes: as amended by Rostekhnadzor Order No. 494 dated 03.12.2020. (Federal Norms and Rules in the field of industrial safety)]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/573219717> (data obrashcheniya: 01.04.2022).

19. OOO "Sovremennye gornye tekhnologii" [OOO "Modern mining technologies"]. URL: <https://s-g-t.ru/> (data obrashcheniya: 01.04.2022).