

## РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.235.535.2

### МОДЕЛЬ РАСЧЕТА СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ МАССОВЫХ ВЗРЫВАХ НА ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКАХ

А. Н. Холодилов<sup>1</sup>, А. П. Господариков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
E-mail: kholodilov@mail.ru, ул. Большая Морская, 67, лит. А, 190000, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский горный университет, E-mail: Gospodarikov\_AP@pers.spmi.ru,  
Васильевский остров, 21 линия, 2, 199106, г. Санкт-Петербург, Россия

Предложена теоретическая модель, позволяющая из анализа велосиграм, зарегистрированных на земной поверхности при подземном взрывании, выявлять сейсмическую активность, являющуюся продолжением сейсмических колебаний после прекращения взрывного воздействия. Сравнением модельных и экспериментальных велосиграм от массовых взрывов показана корректность применения эллиптических фильтров низких частот второго порядка при моделировании волновых форм велосиграм. Подтверждена эффективность применения модели в обнаружении отклонений интервалов времени короткозамедленного взрывания от номинальных значений. Определены условия, при которых прогнозирование пиковой скорости смещения должно основываться на учете массы веществ, взрывааемых за массовый взрыв. Рассмотрены предпосылки возникновения резонансного возбуждения в системе “порodный массив – охраняемый объект” и проведено прогнозирование сейсмического действия взрывных работ.

*Взрывные работы, велосиграма, сейсмическая безопасность, сейсмозрывные колебания, подземный рудник, надшахтные сооружения, прогноз сейсмического воздействия, эллиптический фильтр*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200104

Необходимость изучения сейсмического воздействия взрывных работ на надшахтные сооружения на Ново-Широкинском руднике вызвана обрушением кирпичной кладки непосредственно после массового взрыва. Предварительный анализ показал, что обрушение произошло при оценочном значении пиковой скорости смещения порядка 1.3 см/с [1]. Более подробные исследования, основанные на методе огибающей модуля скорости смещения, привели к выводу о возникновении дополнительного источника сейсмических колебаний в системе “сооружение – грунт”, действующего после окончания взрывного источника сейсмических колебаний [2].

Похожая проблема встречается при разработке удароопасных месторождений [3]. Однако Ново-Широкинское месторождение полиметаллических руд на начальном этапе разработки не относится к таковым. В [4] рассмотрено влияние структурного строения породного массива

на скорость смещения сейсмических колебаний. Исследование грунтовых условий резонансного усиления сейсмических колебаний при прогнозировании пиковой скорости смещения выполнено в [5]. В последнее время для прогнозирования пиковой скорости смещения помимо традиционных формул широкое применение находят модели на искусственных нейронных сетях, нечеткой логике, генетических алгоритмах и др. [6]. Кроме того, следует отметить расчетную модель волнового поля массового взрыва, которая реализуется в виде представления сейсмических колебаний в форме импульса Н. Н. Пузырева [7]. Из приведенных исследований не следует возможность анализа дополнительных источников сейсмических колебаний, появляющихся после окончания действия взрывного источника. Рассмотрим подход, основанный на моделировании волновой формы велосигранмы.

### ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИ

Считаем, что на расстоянии 60 радиусов взрывной скважины в скальной породе колебания среды носят упругий затухающий характер. В первом приближении в основу описания возмущения породного массива положим аппроксимацию для избыточного давления в ударной воздушной волне в зависимости от времени в заданной точке, согласно [8]:

$$\Delta P(t) = \Delta P_0 \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \exp\left(-a \frac{t}{\tau}\right), \quad (1)$$

где  $\Delta P_0$  — давление на фронте ударной воздушной волны;  $\tau$  — длительность фазы сжатия;  $a$  — эмпирический коэффициент.

Учтем, что акустический импеданс горной породы для условий Ново-Широкинского месторождения в 20–30 тысяч раз превышает акустический импеданс воздуха, т. е. релаксация возмущения в породе происходит гораздо быстрее, чем в воздухе. В приближении плоской сейсмической волны напряжение (давление) на фронте сейсмозрывной волны прямо пропорционально скорости смещения. Используя формулу М. А. Садовского и аппроксимацию (1), получим выражение для скорости смещения в заданной точке для короткозамедленного взрыва:

$$v(t) = v_0 \sum_{k=1}^N \left\{ \left( \frac{Q_k}{Q_m} \right)^n \left( 1 - \frac{t - t_{1,k}}{\tau'} \right) \exp \left[ -a \left( \frac{t - t_{1,k}}{\tau'} \right)^b \right] \right\}. \quad (2)$$

Здесь  $Q_k$  — масса заряда взрывчатых веществ (ВВ), приходящаяся на  $k$ -ю группу одновременно взрываемого заряда;  $N$  — количество групп одновременно взрываемых зарядов;  $Q_\Sigma = \sum_{k=1}^N Q_k$  — масса ВВ, взрываемого за массовый взрыв;  $Q_m$  — максимальная масса одновременно взрываемого заряда;  $t_{1,k}$  — момент времени срабатывания  $k$ -й группы одновременно взрываемого заряда, отсчитанный от момента времени срабатывания первой группы зарядов (нулевой ступени замедления,  $t_{1,k=1} = 0$ );  $v_0$  — нормировочная скорость смещения;  $n$  — показатель затухания сейсмических колебаний;  $b$  — эмпирический коэффициент, учитывающий различие акустических импедансов породы и воздуха. Длительность фазы сжатия  $\tau'$  выбирается с учетом наибольшей высоты колонки заряда, скорости детонации ВВ, предполагаемой продолжительности квазистатической стадии взрыва.

В приближении сферического источника сейсмозрывных волн рассмотрим вклад объемной продольной волны и поверхностной волны Рэлея в сейсмическое действие взрыва. С учетом того, что волны происходят из одного источника, а колебания частиц в волне Рэлея имеют радиальную и вертикальную компоненты, разумно предположить аддитивность радиальных компонент волн. Для скорости смещения результирующего колебания получим:

$$v'(t) = \eta_p v(t) + \eta_R v(t - \tau_2), \quad (3)$$

где  $\eta_p$ ,  $\eta_R$  — вклад продольных и поверхностных волн соответственно в амплитуду скорости результирующих колебаний ( $\eta_p + \eta_R = 1$ );  $\tau_2$  — время задержки прихода поверхностных волн относительно момента прихода продольных волн в заданную точку.

Актуальный вид модельных компонент велосигаммы (горизонтальной, вертикальной) может быть получен лишь в случае применения преобразования функции (3), которое по своим характеристикам повторяет поведение среды при динамическом нагружении. В качестве такого преобразования примем фильтр нижних частот (ФНЧ). Сформулируем требования к нему.

Одно из модельных представлений массива — тело Гука, поэтому порядок ФНЧ должен быть четным. Согласно теореме Котельникова, частоту среза ФНЧ выберем в виде  $f \approx 1/(2\tau')$ . Затухание сейсмического сигнала в полосе задерживания ФНЧ принимается  $D_1 = 40$  дБ. Затухание сейсмического сигнала в пределах полосы пропускания ФНЧ  $D_2$  является характеристикой удаленности точки регистрации велосигаммы от очага взрыва и поэтому должно удовлетворять условию  $D_2 < D_1$ .

Существуют различные аппроксимации частотных характеристик фильтров. Выберем эллиптический фильтр [9], симметричный относительно пульсаций амплитудно-частотной характеристики в полосах пропускания и задерживания и обладающий максимальной крутизной в переходной области. В то же время эллиптический фильтр имеет наихудшую фазочастотную характеристику и может слабо подавлять высокочастотные составляющие сигнала. Отмеченные недостатки являются преимуществом эллиптического фильтра с точки зрения передачи динамических свойств горного массива.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ФОРМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ВЕЛОСИГРАММ

Для моделирования волновых форм велосигамм, полученных от массовых взрывов, необходимо определить эмпирические коэффициенты  $a$  и  $b$ , входящие в (2). Для этого воспользуемся велосигаммой, зарегистрированной от взрыва одиночного заряда ВВ на расстоянии 60 радиусов взрывной скважины [10]. В этом случае (2) примет следующий вид:

$$v(t) = v_0 \left( 1 - \frac{t}{\tau'} \right) \exp \left[ -a \left( \frac{t}{\tau'} \right)^b \right].$$

Аппроксимация велосигаммы получена при  $\tau' = 0.8$  мс,  $a = 0.026$ ,  $b = 4$  (рис. 1). Отметим заметную осцилляцию экспериментальной кривой относительно ее аппроксимации. Однако это не ухудшает идентификацию временных областей сжатия и разряжения среды.

При моделировании волновых форм велосигамм, полученных от массовых взрывов при отбойке руды вертикальными веерами, согласно [1], показатель затухания сейсмических колебаний  $n = 2$ . Исходя из средней длины колонки заряда ВВ и средней скорости детонации гранулита АС-8, возьмем в качестве первого приближения длительность фазы сжатия  $\tau' = 10$  мс. Тогда верхняя оценка частоты среза ФНЧ будет  $f = 50$  Гц. Остальные технологические параметры массовых взрывов приведены в [1].

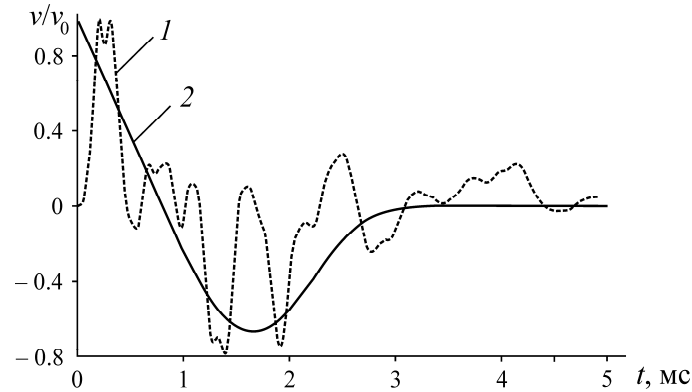


Рис. 1. Велосиграммы рудного тела: 1 — эксперимент; 2 — аппроксимация

Моделирование начинается с согласования начальных участков модельной и экспериментальной велосиграмм путем подбора интервалов времени короткозамедленного взрывания (КЗВ). Затем проводится подгонка времени задержки прихода поверхностных волн и корректировка интервалов времени КЗВ. Заканчивается процедура моделирования подгонкой масштабирующего множителя и долей вклада поверхностных и продольных волн до наилучшего согласия модельных и экспериментальных велосиграмм.

Результаты определения параметров волновых форм велосиграмм для вертикальной компоненты скорости смещения представлены в таблице для эллиптического ФНЧ второго порядка. За исключением массового взрыва I, измерения проводились вблизи охраняемого объекта. В случае массового взрыва I велосиграмма регистрировалась примерно посередине сейсмической трассы между взрывом и охраняемым объектом.

Результаты моделирования волновых форм велосиграмм

Номер взрыва	$Q_z$ , кг	$Q_m$ , кг	$N$	Параметры ФНЧ		Параметры велосиграммы			
				$D_2$ , Дб	$f$ , Гц	$v_0$ , см/с	$\eta_p$	$\eta_R$	$\tau_2$ , мс
I	2986	371	10	16	35	5.3	0.30	0.70	33
IV	2147	360	8	22	38	1.2	0.45	0.55	80
V	1748	471	4	22	38	3.8	0.17	0.83	84
VI	3922	601	8	21	39	5.2	0.50	0.50	66

На рис. 2а показан пример кривой входного сигнала для ФНЧ, построенной с помощью (2) на основе табличных параметров для массового взрыва I, на рис. 2б — модельная (после фильтрации) и экспериментальная велосиграммы для того же взрыва. На рис. 2в, г приведены модельные и экспериментальные велосиграммы для массовых взрывов IV и VI. Замена ФНЧ второго порядка на ФНЧ четвертого практически не приводит к изменению модельных параметров велосиграмм. Различие заключается в необходимости корректировки частоты среза и затухания в полосе задерживания. ФНЧ второго порядка ведет себя более устойчиво, нежели четвертого.

Отмечается весьма существенное различие модельных и проектных времен короткозамедленного взрывания (рис. 3). Проектное время КЗВ составляло 50 мс. Эта проблема присуща системам неэлектрического инициирования взрывания, когда возможно практически одновременное инициирование групп зарядов ВВ, относящихся к различным ступеням замедления [4, 5, 11]. Сейсмическое действие массовых взрывов (за исключением взрыва V) характеризуется совместным вкладом объемных продольных и поверхностных волн в равной пропорции.

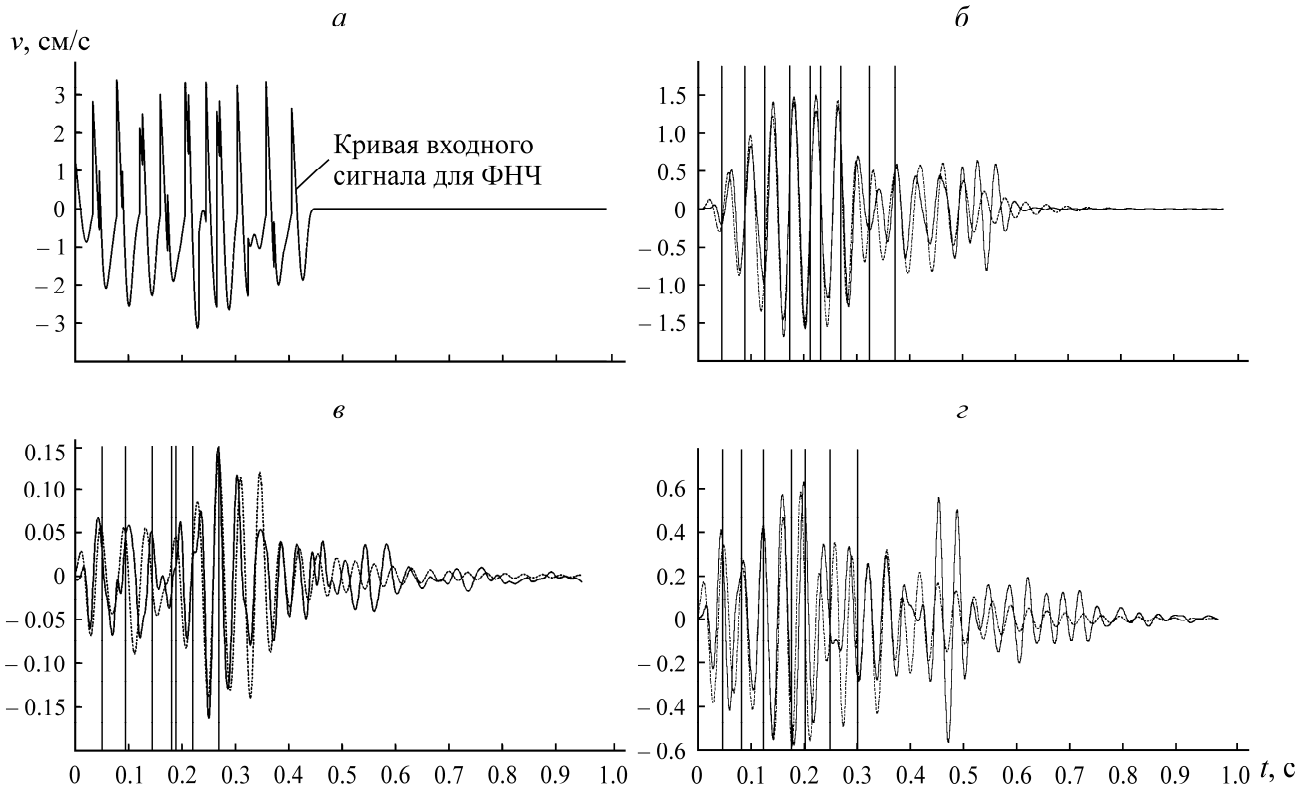


Рис. 2. Велосиграммы от I (а, б), IV (в) и VI (г) массового взрыва: сплошная линия — экспериментальная велосиграмма; штриховая — модельная велосиграмма; вертикальные — моменты времени срабатывания ступеней замедлений

На рис. 2 наблюдаются надежно регистрируемые аномально высокие скорости смещения во временной области, когда сейсмический источник прекратил свое действие. Этот эффект особенно выражен в велосиграмме от массового взрыва VI. В интервале 0.45–0.75 с экспериментальные скорости смещения превышают модельные скорости смещения до 3 раз. Из анализа таблицы следует, что отмеченное превышение надежно коррелирует с массой ВВ, взрываемого за массовый взрыв.

На рис. 3 показано влияние разброса параметров короткозамедленного взрывания на сейсмический эффект взрыва. Отклонение модельных от проектных параметров КЗВ неоднозначно влияет на велосиграмму. Для массового взрыва V отклонение не приводит к изменению пиковых скоростей смещения. В случае взрыва IV наблюдается трехкратное увеличение пиковой скорости смещения. В связи с этим отметим исследование ошибки времени замедления взрывания на сейсмическое действие взрыва [12].

Оценим эквивалентный заряд массового взрыва IV для модельных интервалов замедления по формуле  $Q' = Q_m (v_1 / v_2)^{3/n}$  ( $v_1 / v_2$  — отношение пиковой экспериментальной скорости смещения к пиковой модельной скорости смещения, полученной для проектных параметров КЗВ). Принимая  $Q_m = 360$  кг,  $v_1 / v_2 = 3$ ,  $n = 2$ , получим  $Q' = 1871$  кг. Если  $Q_\Sigma = 2147$  кг, то следует неожиданный вывод: при отклонении параметров КЗВ от проектных значений массовый взрыв по сейсмическому действию становится подобным одновременно взрываемому заряду. В горной практике существует подход, когда для оценки сейсмического действия массового взрыва используется не максимальная масса одновременно взрываемого заряда ВВ, а масса ВВ, взрываемого за массовый взрыв [13].

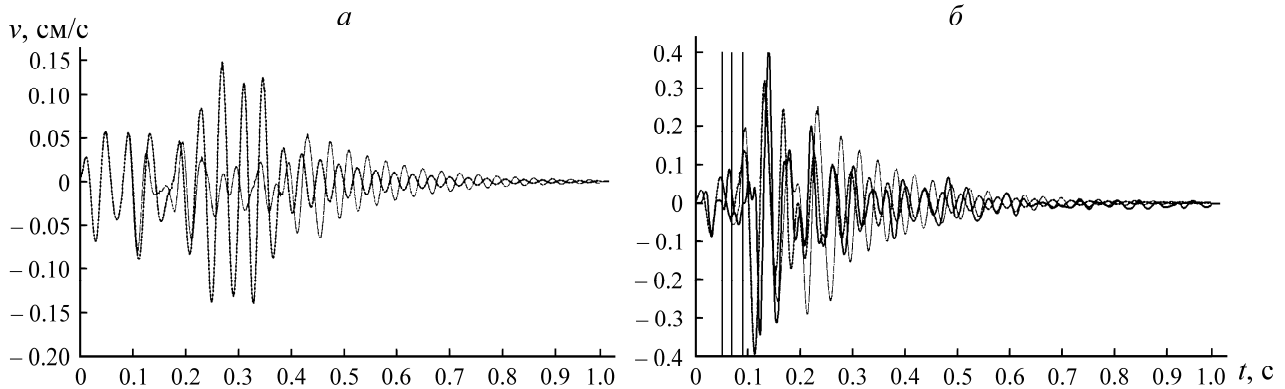


Рис. 3. Велосиграммы от массового взрыва IV (а) и V (б): сплошная линия — экспериментальная велосиграмма; штриховая — модельная велосиграмма с модельными временами КЗВ и проектными временами КЗВ (точки); вертикальные линии — моменты времени срабатывания ступеней замедлений

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Проанализируем аномалию скорости смещения во временной области, в которой первичный источник сейсмических колебаний не действует. Предположим, что физическим объяснением этого явления служит временная аккумуляция энергии сейсмических колебаний породным массивом. Тогда следует рассматривать породный массив в качестве вторичного источника сейсмических колебаний. В первом приближении первичный источник можно считать квазипериодическим с частотой генерации сейсмических колебаний примерно 25 Гц. Поскольку сейсмические колебания вторичного источника происходят с той же частотой, то создаются предпосылки резонансного возбуждения самого породного массива вблизи надшахтных сооружений.

Будем считать, что изменение амплитуды происходит по показательному закону [14]. Для оценки отношения пиковой экспериментальной скорости смещения к пиковой модельной скорости смещения от вторичного источника примем следующее уравнение регрессии:

$$\ln \frac{v'_1}{v'_2} = k_1 Q_\Sigma + k_2, \tag{4}$$

здесь  $k_1, k_2$  — коэффициенты регрессии. Для массы  $Q_\Sigma$ , выраженной в тоннах,  $k_1 = 0.38, k_2 = -0.38$ . Условие  $v'_1 / v'_2 = 1$  означает отсутствие вторичного источника, откуда  $Q_\Sigma = 1$  т.

Уточним прогноз сейсмической обстановки в районе охраняемого объекта перед обрушением кирпичной кладки стены, рассмотренный в [1]. Параметры массового взрыва:  $Q_\Sigma = 5052$  кг,  $Q_m = 1946$  кг. Расстояние от массового взрыва до аварийной части здания составило  $R = 277$  м.

В предположении отклонения параметров КЗВ от проектных значений определим значение приведенного расстояния  $\bar{R}_\Sigma = R / Q_\Sigma^{1/3} = 16.1$  м/кг<sup>1/3</sup>. В расчете на максимальную массу ВВ в группе одновременно взрывааемых зарядов значение приведенного расстояния  $\bar{R}_\Sigma = R / Q_m^{1/3} = 22.2$  м/кг<sup>1/3</sup>, которому соответствует пиковое значение вертикальной компоненты скорости смещения  $v_v = 1.3$  см/с. В этом случае прогноз будет  $v'_v = (\bar{R}_m / R_\Sigma)^n = 2.5$  см/с.

В приближении существования резонансного возбуждения в системе “породный массив – охраняемый объект”, согласно (4), получим  $v_1' / v_2' = 4.7$ . Из анализа велосигramмы от массового взрыва VI (рис. 2в) следует, что отношение пиковых вертикальных компонент скоростей смещения от вторичного и первичного источников сейсмических колебаний соответственно равно примерно  $\eta = 1.3$ . Тогда прогноз будет от значения  $v_v'' = v_v \cdot v_1' / v_2' \cdot \eta = 2$  см/с до значения  $v_v''' = v_v \cdot v_1' / v_2' \cdot \eta = 3.9$  см/с. Из приведенного анализа следует, что для обеспечения промышленной безопасности охраняемого объекта по сейсмическому фактору необходимо, чтобы пиковая скорость смещения от вторичного источника колебаний не превышала пиковую скорость смещения от первичного (взрывного) источника колебаний.

В соответствии с [1] принято предельно допустимое значение для пиковой вертикальной компоненты скорости смещения, равное 0.7 см/с, которое оказалось превышенным более чем в 5 раз в случае самого неблагоприятного прогноза.

### ВЫВОДЫ

Теоретическая модель обнаружения сейсмических воздействий, не связанных со взрывным источником сейсмических колебаний, позволяет из анализа велосигramм, зарегистрированных на земной поверхности при подземном взрывании, выявлять сейсмическую активность в системе “породный массив – охраняемый объект” и отклонение интервалов времени короткозамедленного взрывания от номинальных значений.

Определено условие существования вторичного источника сейсмических колебаний и установлен относительный вклад продольных и поверхностных сейсмозрывных волн в сейсмическое воздействие на охраняемый объект. Сравнением модельных и экспериментальных велосигramм от массовых взрывов показана корректность применения эллиптических фильтров низких частот четного порядка при моделировании волновых форм велосигramм. В отдельных случаях при отклонении параметров короткозамедленного взрывания от проектных значений массовый взрыв по сейсмическому действию оказывается подобным одновременно взрываемому заряду. Предельное значение уровня сейсмического воздействия, при котором обеспечивается безопасность охраняемого объекта, соответствует равенству пиковых значений скоростей смещения сейсмического отклика системы “породный массив – охраняемый объект” и взрывного источника сейсмических волн.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемов В. А., Виноградов Ю. И., Холодилов А. Н., Густов С. В., Щербаков Н. Я. Исследование сейсмобезопасных условий производства массовых взрывов на руднике ОАО “Ново-Широкинский рудник” // Взрывное дело. — 2011. — № 105/62. — С. 239–252.
2. Холодилов А. Н., Господариков А. П. Методология оценки сейсмической безопасности массовых взрывов, производимых на подземных рудниках, вблизи надшахтных сооружений // ГИАБ. — 2016. — № 2. — С. 320–328.
3. Еременко А. А., Машуков И. В., Еременко В. А. Геодинамические и сейсмические явления при обрушении блоков на удароопасных месторождениях Горной Шории // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 70–76.
4. Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Пороховский Н. Н., Гришин А. Н., Кулинич Н. А., Рублев Д. Е., Юшкин А. В. О влиянии массового взрыва в карьере строительного камня на формирование спектра сейсмических волн // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 74–89.

5. **Верхоланцев А. В., Дягилев Р. А., Шулаков Д. Ю., Шкурко А.В.** Мониторинг сейсмического воздействия взрывов на карьере “Шахтау” // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 59–69.
6. **Prashanth R. and Nimaje D. S.** Estimation of peak particle velocity using soft computing technique approaches, *Noise and Vibration Worldwide*, 2018, Vol. 49, Issue 9–10. — P. 302–310.
7. **Кишкина С. Б.** Сейсмический эффект массовых химических взрывов на карьерах Курской магнитной аномалии: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М., 2002. — 27 с.
8. **Физика взрыва** / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2004. — 832 с.
9. **Оппенгейм А., Шафер Р.** Цифровая обработка сигналов. — М.: Техносфера, 2006. — 856 с.
10. **Холодилов А. Н., Артемов В. А., Виноградов Ю. И.** Методические основы выбора линии наименьшего сопротивления при взрывной отбойке горных пород на основе данных акселерометрии // ГИАБ. — 2013. — № 5. — С. 314–318.
11. **Эквист Б. В.** Повышение безопасности короткозамедленного взрывания // ГИАБ. — 2017. — № 5. — С. 389–394.
12. **Han L., Li H., Liu D., Ling T., Li C., and Liang S.** Probability analysis for influence of time-delay error of detonators on superposed seismic wave vibration reduction, *J. of Vibration and Shock*, 2019, Vol. 38, No. 3. — P. 96–101.
13. **Pandula V. and Jelšovská K.** New criterion for estimate of ground vibrations during blasting operations in quarries, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 2008, Vol. 5, Issue 2 (150). — P. 147–152.
14. **Якубович В. А., Старжинский В. М.** Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения. — М.: Наука, 1972. — 720 с.

*Поступила в редакцию 28/X 2019*

*После доработки 03/II 2020*

*Принята к публикации 04/II 2020*