

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.235.535.2

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ВЗРЫВАХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

С. К. Бисойи, Б. К. Пал

*Национальный технологический институт,
E-mail: sbsunil3@gmail.com, drbkpal2007@gmail.com, 769008, г. Руркела, Одиша, Индия*

С помощью эмпирических зависимостей доказана корректность прогнозирования поверхностных колебаний с высокой точностью, но их недостаток — использование только двух параметров буровзрывных работ. Выявлено, что методы статистической регрессии позволяют точно спрогнозировать пиковую скорость частиц в сейсмической волне, которая зависит от многих начальных параметров. Методом регрессии на основе гауссовского процесса получен наиболее верный прогноз поверхностных колебаний по сравнению с линейными методами регрессии и эмпирическими прогнозирующими зависимостями.

Сейсмические колебания, взрывные работы, пиковая скорость колебаний, эмпирические зависимости, модели статистической регрессии, регрессия на основе гауссовского процесса

DOI: 10.15372/FTPRPI20200306

Взрывные работы — производительный, простой и дешевый метод добычи полезных ископаемых, применяемый на малых и больших месторождениях по всему миру. Но, несмотря на преимущество по сравнению с другими методами, они энергетически неэффективны. Известно, что на разрушение породы используется 20 % энергии, содержащейся во взрывчатых веществах [1]. Остальная часть тратится на тепло, звуковые и сейсмические колебания. Хотя данный метод наименее расходный, издержки на взрывные работы составляют большую часть общих затрат на добычу при разработке месторождения: 20 % приходится на взрывные работы, а менее 5 % — на стадию производства [2].

Для дробления породы необходимо использовать много энергии, но это всегда приводит к нежелательным последствиям. На районы, расположенные вблизи месторождения, влияют поверхностные и звуковые колебания, из-за чего сокращается срок службы зданий и наносится вред окружающей фауне и человеку. Цель настоящей работы — анализ методов прогнозирования колебаний, вызванных взрывом на открытом месторождении. В качестве параметра, характеризующего интенсивность колебаний в сейсмической волне, принимается пиковая скорость частиц. Ключевая задача состоит в прогнозировании выходных параметров взрыва. Модели прогнозирования позволяют инженерам спроектировать более эффективный процесс выполнения взрывных работ в условиях своих месторождений, а также предусмотреть возможные последствия.

В [3] проведено исследование воздействия взрывных работ на людей и оценен уровень звукового дискомфорта населения в обычной жизни. Выявлено, что средний уровень звукового давления равен 110 дБ, а на пике — 122 дБ. Хотя данное значение находится в рамках стандартов USBM (Горное бюро США), люди отмечают дискомфорт при таком уровне звукового давления. В [4] установлено, что колебания от взрыва в пределах 82–89 дБ влияют на прочность бортов карьеров. Поэтому необходимо пересмотреть стандарты, принятые в прошлом.

Взрыв — результат быстро протекающей химической реакции, при которой высвобождается большое количество газа под высоким давлением за маленький промежуток времени. Он генерирует волны трех типов: продольную волну давления, сдвиговую волну и волну Рэлея. Частицы, находящиеся в волне давления, движутся по направлению распространения волны, частицы вторичных волн (*S*-волн) — перпендикулярно ему, а в волне Рэлея, распространяющейся с наименьшей скоростью, частицы проходят по эллипсоидной траектории в вертикальной плоскости по направлению распространения волны (рис. 1). Колебания передаются наружу сферически по всем направлениям [5, 6]. Ближайшая к взрывной скважине порода разрушается из-за деформации сжатия, а последующие слои — из-за деформации растяжения. Из области инженерной сейсмологии известно, что реакция любых сооружений на влияние поверхностных колебаний возникает, когда частота колебаний близка к резонансной частоте зданий. Резонанс частот может привести к обрушению строения, если он воздействует продолжительное время. При этом повышается амплитуда колебаний, которая приводит к повреждениям из-за деформации разрушения [7–8].

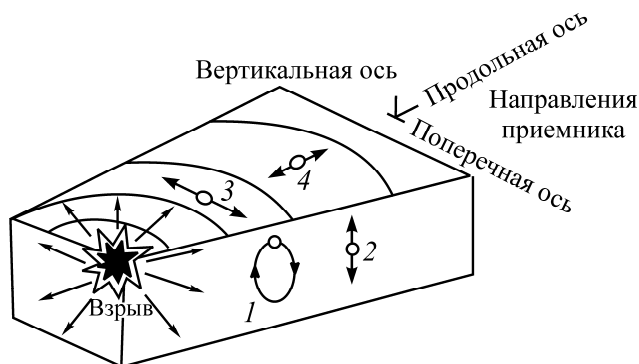


Рис. 1. Направление движения частиц в зависимости от типа волны: 1 — волна Рэлея; 2 — волна вертикального сдвига; 3 — сдвиговая волна; 4 — волна сжатия [9]

В [10, 11] проведено исследование промышленных источников поверхностных колебаний. Утверждается, что сооружения по-разному реагируют на колебания, поэтому их следует рассматривать независимо друг от друга. Применен инструмент Blastmate для исследования и оптимизации параметров взрыва в целях сокращения количества негабаритных кусков. Этому способствовало увеличение линии наименьшего сопротивления и плотности расположения зарядов. В отдельных случаях изменение колонковых и распределенных зарядов привело к положительным результатам без изменения линии наименьшего сопротивления. Пиковая скорость частиц — один из важных параметров оценки поверхностных колебаний. В [12–15] определены другие параметры прогнозирования поверхностных колебаний: максимальный заряд в интервале задержки и расстояние от места взрыва до точки измерения. На основе данных параметров многие исследователи пытались спрогнозировать вызываемые взрывом колебания и предложили ряд эмпирических прогнозирующих зависимостей, некоторые из которых эффективны до сих пор [14, 16–18]. Чтобы получить надежные результаты для прогноза такого сложного процесса, как поверхностные колебания, двух параметров недостаточно, также име-

ются ограничения для этих зависимостей. В [19] использовано 220 наборов данных по колебаниям и предложена зависимость, которая дает более высокий коэффициент детерминации по сравнению с эмпирическими зависимостями, но предлагаемая формула может обеспечивать точные результаты только при определенных условиях.

Многие исследователи пытались применить различные математические подходы, например методы статистической регрессии, для выявления связей разных параметров с поверхностными колебаниями. Если взрывные работы выполнены некачественно, то образуется большое количество крупных кусков вместо необходимой фракции. Для измельчения взрывом таких кусков (вторичные взрывные работы) также требуется расход взрывчатого вещества, что приводит к дополнительным затратам на добычу [20]. В [21] представлена попытка использовать этот метод регрессии для взрывных работ с помощью двух входных параметров: расстояния от места взрыва и максимального заряда на единицу задержки. Следует обращать повышенное внимание на низкочастотные колебания. Рассмотрена усовершенствованная регрессия масштабного расстояния, которая дала коэффициент детерминации $R^2 = 0.93$ на одном месторождении и не менее 0.8 на других [22]. В [23] описаны различные методы регрессии для прогнозирования колебаний и найден коэффициент детерминации $R^2 = 0.84$ для эмпирической формулы Садова и 0.94 для устойчивой регрессии доступных данных. В [24] задействованы 11 входных параметров, 9 из которых независимы, чтобы провести оптимизацию взрывных работ для снижения пиковой скорости частиц. Сделано заключение, что наиболее важные параметры — диаметр и глубина скважины, расстояние между скважинами в ряду, линия наименьшего сопротивления, количество заряда к скважине, предел прочности на одноосное сжатие и удельный расход взрывчатого вещества, а пористость и плотность породы не повлияли на результат. В [24–26] применялись методы искусственной нейронной сети и многовариантного регрессионного анализа для прогнозирования колебаний, вызванных взрывом. Реализован гибридный метод нейронной сети с общей регрессией, который позволил получить коэффициент детерминации $R^2 = 1$, но использован малый объем статистических данных.

Линейной регрессией называют линейную зависимость между входными и выходными переменными. Если принять y за зависимую переменную, а X — за независимую, то модель множественной линейной регрессии будет выглядеть так:

$$y_i = m_0 + m_1 X_{i1} + m_2 X_{i2} + \dots + m_p X_{ip} + e_i, \quad i = 1, \dots, n,$$

где y_i — i -я реакция; m_k — k -й коэффициент; m_0 — постоянная величина; X_{ip} — i -й входной параметр j -го прогнозируемого значения; e_i — i -я случайная ошибка (ошибка, вызванная шумами).

В обобщенном виде модель линейной регрессии приобретает следующий вид:

$$y_i = m_0 + \sum_{k=1}^k m_k f_k(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ip}), \quad i = 1, \dots, n,$$

где $f(\dots)$ может быть любой скалярной функцией независимых переменных, включая нелинейные функции. Линейность уравнения задается коэффициентом m_k .

Регрессию на основе гауссовского процесса относят к вероятностным моделям, которые можно применять для прогнозирования зависимой переменной от некоторого числа входных параметров. В данной работе она рассчитывается с помощью ПО MATLAB 2018a. Этот процесс регрессии использует средний вектор и ковариационную матрицу для выявления вероятности прогнозируемого результата. Примем μ за математическое ожидание распределения и σ^2 — за вариацию, тогда

$$P(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}.$$

В данном случае ковариационное распределение имеет вид экспоненциальной квадратичной функции. Для разных ядер ковариационная функция, которая определяет гауссовский шум, будет разной. Например,

$$k(x_i, x_j) = \left(1 + \frac{d(x_i, x_j)^2}{2\alpha l^2} \right)^{-\alpha}$$

— это ковариационная функция рационального квадратичного ядра, где параметризация выполняется через параметр длины $l > 0$ и смешанный параметр масштаба $\alpha > 0$.

ОБЩЕПРИНЯТЫЕ ЭМПИРИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗИРУЮЩИЕ ЗАВИСИМОСТИ

Найдено девять параметров, на основе которых можно спрогнозировать пиковую скорость частиц с помощью традиционных эмпирических прогнозирующих зависимостей, приведенных ниже:

- стандарт USBM [14] $k(D / \sqrt{Q_{\max}})^n$;
- формула Амбрасейса – Хендрона [27] $k(D / \sqrt[3]{Q_{\max}})^n$;
- индийский стандарт [28] $k(Q_{\max} / D^{2/3})^n$;
- формула Роя [15] $n + k(D / \sqrt{Q_{\max}})^{-1}$.

Здесь k и n — постоянные, которые рассчитаны на основе данных, собранных с открытого месторождения и с помощью метода анализа статистической регрессии.

ОБЛАСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Полевые испытания проводились на карьере Донгри Бузург в районе Бхандара, штат Махараштра, Индия, расположенный в 120 км от ближайшего города Нагпур (рис. 2). С восточной стороны высота карьера достигает 395 м над уровнем моря. В четырех километрах на север протекает река Баванхади. В данном карьере добывается марганцевая руда. Размеры уступов: высота борта 10 м, ширина подошвы 15 м. Коэффициент вскрыши 1:9. Общий уклон 32–33°. Геомеханическая классификация Бенявского здесь изменяется от 24 до 70 [29]. Применяются эмульсионные взрывчатые вещества с удельным расходом 0.4 кг/м³. Размер минеральных запасов карьера оценивается свыше 4.1 млн т, а размер запасов вокруг — 14 млн т с содержанием марганца в руде от 10–48 %. Ежегодно добывается 300 тыс. т марганцевой руды с извлечением свыше 90 %.



Рис. 2. Местоположение карьера Донгри Бузург (областной центр Бхандара)

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате регистрации сейсмических колебаний от взрывных работ на карьере собрано 98 наборов параметров экспериментальных взрывов. Значения пиковой скорости частиц найдены с помощью вибромонитора Blastmate. В табл. 1 представлена часть параметров и их значения, полученные во время полевых испытаний. Результирующие значения модулей векторов пиковой скорости частиц рассчитаны по значениям вертикальных, поперечных и радиальных компонент. Из проведенных ранее исследований выбрано несколько параметров, значения которых определены в условиях карьера Донгри Бузург (табл. 2).

Измерена пиковая скорость частиц при взрывах виброметром Minimate Series II. Методами регрессии рассчитаны постоянные, характеризующие исследуемое месторождение.

Принимая V за пиковую скорость частиц, D — за расстояние от станции мониторинга до места взрыва, а Q — за максимальный заряд в интервале задержки, рассчитали другие параметры для вычисления постоянных n и k . Для этого использован простой метод линейной регрессии с переменными x , y и c :

$$y = \log V, \quad x = \log \frac{D}{\sqrt{Q}}, \quad c = \log k.$$

ТАБЛИЦА 1. Значение параметров, полученных во время полевых испытаний

№ п/п	Расстояние между скважинами, м	ЛНС, м	ВВ на скважину, кгс	Расстояние от места взрыва до станции мониторинга, м	Диаметр скважины, м	Глубина скважины, м	Высота забойки, м	Количество скважин	Максимальный заряд на единицу задержки, кгс	ПСЧ, мм/с
1	3.0	3.5	25	160	110	8	3	30	750	0.57
2	3.0	3.5	15	110	110	6	2	35	525	0.76
3	2.5	3.0	15	170	110	6	2	35	525	0.05
4	3.0	3.5	34	120	110	10	4	80	2720	2.20
5	3.0	3.5	34	115	110	10	4	95	3230	2.40
6	2.5	3.0	25	180	110	8	3	30	750	0.02
7	2.5	3.0	15	160	110	6	2	30	450	0.09
8	3.0	3.5	25	140	110	8	3	90	2250	1.52
9	3.0	3.5	34	130	110	10	4	100	3400	2.37
10	3.0	3.5	25	110	110	8	3	80	2000	1.21
11	2.5	3.0	25	180	110	8	3	100	2500	0.78
12	3.0	3.5	34	120	110	10	4	100	3400	1.85
13	2.5	3.0	34	100	110	10	4	120	4080	3.39
14	2.5	3.0	25	110	110	8	3	105	2625	2.55
15	3.0	3.5	25	160	110	8	3	50	1250	0.48
16	2.5	3.0	34	120	110	10	4	140	4760	7.00
17	3.0	3.5	34	65	110	10	4	140	4760	17.47
18	3.0	3.5	34	120	110	10	4	80	2720	3.74
19	2.5	3.0	25	120	110	8	3	90	2250	2.89
20	3.0	3.5	34	160	110	10	4	120	4080	2.04

Примечание. ЛНС — линия наименьшего сопротивления; ПСЧ — пиковая скорость частиц; ВВ — взрывчатые вещества

ТАБЛИЦА 2. Выбранный параметр и его диапазон

Параметр	Условия карьера	Диапазон
Входной	Расстояние между скважинами, м	2.5–3
	ЛНС, м	3.0–3.5
	ВВ на скважину, кгс	15–34
	Расстояние от места взрыва, м	65–220
	Диаметр взрывной скважины, мм	110
	Глубина взрывной скважины, м	6–10
	Высота забойки, м	2–4
	Количество скважин	30–140
	Максимум заряд на единицу задержки, кгс	450–4760
Выходной	ПСЧ, мм/с	0.02–17.47

Значение x использовано для расчета постоянных в эмпирической формуле стандарта USBM и различается:

— для формулы Амбрассейса – Хендрона

$$x = \log \frac{D}{\sqrt[3]{Q}};$$

— формулы из индийского стандарта

$$x = \log \frac{Q}{D^3};$$

— формулы Роя

$$x = \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1}.$$

В табл. 3 представлены рассчитанные значения переменных x и y , по всему объему которых с помощью линейной регрессии найдены постоянные, характеризующие месторождение и использующиеся в формулах для прогнозирования значений пиковой скорости частиц при соответствующих параметрах (табл. 4). Для определения коэффициента детерминации R^2 результаты эмпирических прогнозирующих зависимостей сравнивались с измеренными значениями, полученными на полевых испытаниях:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - f_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2},$$

где y_i — измеренное значение; f_i — спрогнозированное значение; $\bar{y}$ — среднее значение y_i .

Некоторые зависимости, например стандарт USBM, показывают высокое соответствие измеренным значениям. На рис. 3 видно, что спрогнозированные значения других зависимостей расходятся на более высоких значениях пиковой скорости частиц.

ТАБЛИЦА 3. Формулы для расчета эмпирических зависимостей

$\log V$	$\sqrt{Q}$	$\frac{D}{\sqrt{Q}}$	$\log \frac{D}{\sqrt{Q}}$	$D^{\frac{2}{3}}$	$\log \frac{\sqrt{Q}}{D^{\frac{2}{3}}}$	$\log \frac{D}{Q^{\frac{1}{3}}}$	$\log \frac{Q}{D^{\frac{2}{3}}}$	$\frac{\sqrt{Q}}{D}$
-0.246	27.386	5.842	0.767	29.472	0.703	1.246	1.406	0.171
-0.118	22.913	4.801	0.681	22.958	0.680	1.135	1.359	0.208
-1.284	22.913	7.419	0.870	30.688	0.617	1.324	1.233	0.135
0.342	52.154	2.301	0.362	24.329	1.024	0.934	2.048	0.435
0.380	56.833	2.023	0.306	23.648	1.068	0.891	2.135	0.494
-1.651	27.386	6.573	0.818	31.880	0.686	1.297	1.372	0.152
-1.038	21.213	7.542	0.878	29.472	0.592	1.320	1.184	0.133
0.183	47.434	2.951	0.470	26.962	0.961	1.029	1.921	0.339
0.374	58.310	2.229	0.348	25.662	1.061	0.937	2.122	0.449
0.083	44.721	2.460	0.391	22.958	0.970	0.941	1.940	0.407
-0.109	50.000	3.600	0.556	31.880	0.947	1.123	1.894	0.278
0.268	58.310	2.058	0.313	24.329	1.073	0.902	2.145	0.486
0.530	63.875	1.566	0.195	21.544	1.139	0.796	2.277	0.639
0.406	51.235	2.147	0.332	22.958	1.029	0.902	2.058	0.466
-0.319	35.355	4.525	0.656	29.472	0.814	1.172	1.627	0.221
0.845	68.993	1.739	0.240	24.329	1.146	0.853	2.291	0.575
1.242	68.993	0.942	-0.026	16.166	1.234	0.587	2.469	1.061
0.573	52.154	2.301	0.362	24.329	1.024	0.934	2.048	0.435
0.461	47.434	2.530	0.403	24.329	0.983	0.962	1.966	0.395
0.309	63.875	2.505	0.399	29.472	1.071	1.001	2.141	0.399
-1.090	44.721	4.919	0.692	36.443	0.870	1.242	1.739	0.203
0.541	48.734	2.565	0.409	25.000	0.989	0.972	1.978	0.390
0.052	46.098	3.254	0.512	28.231	0.938	1.067	1.877	0.307
0.171	50.498	2.970	0.473	28.231	0.978	1.041	1.956	0.337
0.112	45.166	3.321	0.521	28.231	0.929	1.073	1.859	0.301

Эмпирические зависимости удобны для проектирования взрывных работ и оценки ситуации, но имеют свои ограничения. Некоторые зависимости могут точнее спрогнозировать пиковую скорость частиц с большей вероятностью при заданных требуемых параметрах. В этих методах используются различные параметры в качестве входных данных и пиковая скорость частиц как результат. Для определения наиболее подходящего метода регрессии выявлены способы, позволяющие спрогнозировать пиковую скорость частиц. Один из таких методов — анализ линейной регрессии. На рис. 4, согласно расчетам по собранным на карьере данным, представлены спрогнозированные значения пиковой скорости частиц различными вариантами анализа линейной регрессии.

ТАБЛИЦА 4. Постоянные, характеризующие месторождение, для различных эмпирических зависимостей

Эмпирическая зависимость	n	k
Стандарт USBM [14]	-2.4278	18.548120
Формула Амбрасейса – Хендрона [28]	-2.9437	1455.794000
Индийский стандарт [28]	1.5037	0.001686
Формула Роя [15]	-3.3435	15.140000

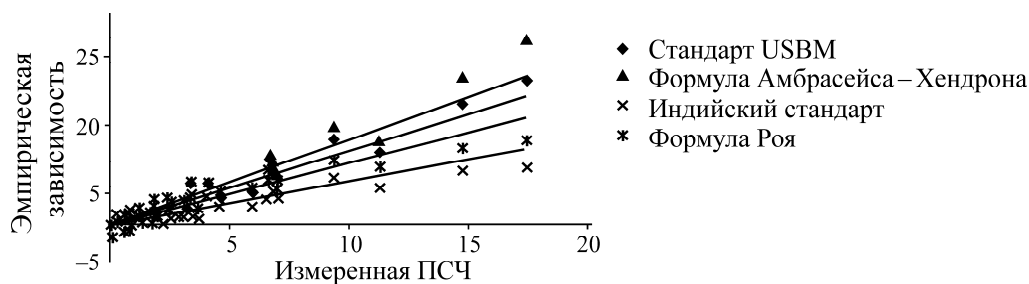


Рис. 3. Сравнение эмпирическими зависимостями спрогнозированных значений пиковой скорости частиц (ПСЧ) с измеренными

Подобным образом на рис. 4 представлены спрогнозированные значения пиковой скорости частиц различными вариантами метода регрессии на основе гауссовского процесса. Видно, что наиболее корректные результаты получаются при использовании анализа регрессии на основе гауссовского процесса.

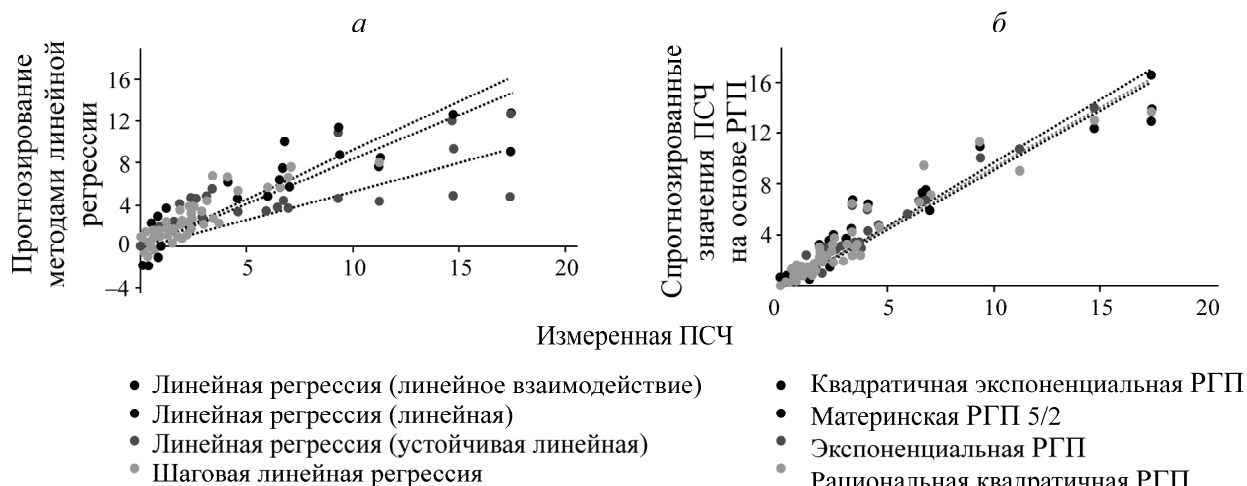


Рис. 4. Сравнение полученных методами линейной регрессии (а) и регрессии на основе гауссовского процесса (РГП) (б) значений пиковой скорости частиц с измеренными

АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Значения пиковой скорости частиц, спрогнозированные зависимостями стандарта USBM и формулой Амбрасейса–Хендрона, близки к измеренным значениям на полевых испытаниях. Такой результат оказался неожиданным, так как ранее работах отмечалась их низкая эффективность. Однако погрешность эмпирических зависимостей остается высокой (табл. 5).

Из табл. 6 видно, что наибольшая корреляция (0.9929) соответствует экспоненциальной регрессии на основе гауссовского процесса, хотя корреляция некоторых вариантов регрессии невысока. Это относится к устойчивой линейной регрессии, которая игнорирует данные, так как они влияют на отклонение линии тренда. Такое пренебрежение может сказываться на низком значении коэффициента детерминации и высоком значении среднеквадратической ошибки. Регрессия — более надежный метод прогнозирования поверхностных колебаний, хотя некоторые эмпирические зависимости прогнозируют пиковую скорость частиц с высокой точностью.

ТАБЛИЦА 5. Корректность эмпирических зависимостей прогнозирования пиковой скорости частиц, %

Метод прогнозирования эмпирических зависимостей	R^2	MAE	RMSE	MAPE
Стандарт USBM [14]	0.9192	0.6595	1.0108	51.0828
Формула Амбрасейса – Хендрона [28]	0.8990	0.8356	1.6110	52.7389
Индийский стандарт [28]	0.6803	0.8544	1.5688	67.0869
Формула Роя [15]	0.8362	0.7785	1.0897	154.1317

Примечание. R^2 — коэффициент детерминации; MAE — средняя абсолютная ошибка; RMSE — среднеквадратическая ошибка; MAPE — средняя абсолютная ошибка

ТАБЛИЦА 6. Корректность методов регрессии прогнозирования пиковой скорости частиц, %

Метод прогнозирования		R^2	MAE	RMSE	MAPE
Линейная регрессия	Линейная регрессия (линейное взаимодействие)	0.8551	0.708978	1.06363	89.6599
	Линейная регрессия (линейная)	0.7068	0.967967	1.513198	142.0851
	Линейная регрессия (устойчивая линейная)	0.6833	0.902513	2.035667	49.1805
	Шаговая линейная регрессия	0.8438	0.749395	1.104275	103.4222
РГП	Квадратичная экспоненциальная РГП	0.8887	0.613937	0.935444	66.9713
	Материнская 5/2 РГП	0.9134	0.529189	0.826312	49.1227
	Экспоненциальная РГП	0.9929	0.157909	0.247637	12.7575
	Рациональная квадратичная РГП	0.9077	0.548188	0.852361	51.6417

Примечание. РГП — регрессия на основе гауссовского процесса

ВЫВОДЫ

Эмпирические зависимости помогают при проектировании месторождений и моделировании эффективности взрывных работ. Проанализировано влияние 9 основных входных параметров буровзрывных работ на пиковую скорость колебаний в сейсмической волне, кроме диаметра взрывных скважин, который оставался постоянным при всех измерениях.

Значения, полученные с помощью эмпирических зависимостей, оказались близки к данным полевых испытаний. Стандарт USBM и формула Амбрасейса – Хендрона спрогнозировали пиковую скорость частиц с высоким коэффициентом детерминации 0.9192 и 0.8990 соответственно, в то время как другие рассмотренные зависимости не показали высокой точности при использовании данных входных параметров.

Методы линейной регрессии, такие как устойчивая линейная или ординарная линейная регрессии, оказались неэффективными в прогнозировании поверхностных колебаний. Регрессия на основе гауссовского процесса продемонстрировала высокие результаты при применении данных входных параметров. При экспоненциальной регрессии на основе гауссовского процесса выявлены наиболее высокий коэффициент детерминации 0.9929 и наименьшее значение средней абсолютной ошибки 12.75 %.

Авторы благодарят технический персонал карьера Донгри Бузург, в частности Д. Пантавейна и доктора Г. Г. Манекара, а также администрацию Национального технологического института за обеспечение необходимым оборудованием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hamdi E., Romdhane N. B., Mouza J. Du, and Cleac'h J. M.** Fragmentation energy in rock blasting, *Geotech. Geol. Eng.*, 2008, Vol. 26, No. 2. — P. 133–146. doi:10.1007/s10706-007-9153-4.
2. **National Park Service**, National Park Service Handbook for the Transportation and Use of Explosives, 1999. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/AN00379624.bib>.
3. **Faramarzi F., Farasangi, M. A. E., and Mansouri H.** Simultaneous investigation of blast induced ground vibration and airblast effects on safety level of structures and human in surface blasting, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2014, Vol. 24, No. 5. — P. 663–669. doi: 10.1016/j.ijmst.2014.07.006.
4. **Afeni T. B. and Osasan S. K.** Assessment of noise and ground vibration induced during blasting operations in an open pit mine – A case study on Ewekoro limestone quarry, Nigeria, *Min. Sci. Technol.*, 2009, Vol. 19, No. 4. — P. 420–424. doi: 10.1016/S1674-5264(09)60078-8.
5. **Duvall W. I. and Petkof B.** Spherical Propagation of Explosion-generated Strain Pulses in Rock, 1959. <http://www.worldcat.org/title/spherical-propagation-of-explosion-generated-strain-pulses-in-rock/oclc/12296319>.
6. **Aliabadian Z., Sharafisafa M., and Nazemi M.** Simulation of Dynamic Fracturing of Continuum Rock in Open Pit Mining, *Geomaterials*, 2013, No. 3. — P. 82–89. doi:10.4236/gm.2013.33011.
7. **Jordan B.** Mine blasting vibration and its effects on buildings and structures – implementing a frequency-based approach, *Aust. Earthg. Eng. Soc. Annu. Conf.*, 2011.
8. **McKenzie C.** Quarry blast monitoring: Technical and Environmental Perspectives, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 1991, Vol. 28, No. 2–3. — P. 23–29. doi:10.1016/0148-9062(91)93027-4.
9. **Richard A. B. and Moore A. J.** Blast vibration course: measurement, assessment, control, *Terrock Consult. Eng. (Terrock Pty. Ltd.)*, Aust. 2012.
10. **Dey K. and Pal B. K.** Ground Vibration – Unique Case Studies in Indian Coal Mines, 6th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engg., Arlington, 2008. — P. 1–4.
11. **Pal B. K.** Optimization of blast design parameters to improve productivity and to reduce ground vibration in opencast mines, *J. Mines, Met. Fuels*, 1999. — P. 36–40.
12. **Ghasemi E., Sari M., and Ataei M.** Development of an empirical model for predicting the effects of controllable blasting parameters on flyrock distance in surface mines, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, 2012, Vol. 52. — P. 163–170. doi:10.1016/j.ijrmms.2012.03.011.
13. **Ghasemi E., Ataei M., and Hashemolhosseini H.** Development of a fuzzy model for predicting ground vibration caused by rock blasting in surface mining, *J. Vib. Control*, 2013, Vol. 19, No. 5. — P. 755–770. doi:10.1177/1077546312437002.
14. **Duvall, W. I. and Fogelson D. E.** Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations, *US Department of the Interior, Bureau of Mines*, 1962.
15. **Roy P. P.** Putting ground vibration predictions into practice, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 1993, Vol. 30, No. 5. — P. 63–67. doi:10.1016/0148-9062(93)92499-G.
16. **Brown R. J.** Blast vibration analysis, *Eng. Geol.*, 1984, Vol. 20, No. 3. — P. 267–278. doi:10.1016/0013-7952(84)90009-7.
17. **Sadaghee A. and Khushrou H.** A comparison of empirical methods and evolutionary programming to predict blast-induced ground vibration, *Int. Society for Rock Mech. And Rock Eng.*, 12th ISRM Congress, 2011.
18. **Langefors U. and Kihlstrom B.** The Modern Technique of Rock Blasting, 3rd Edition, Wiley, 1978.
19. **Rai R. and Singh T. N.** A new predictor for ground vibration prediction and its comparison with other predictors, *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, 2004, Vol. 11, No. 3. — P. 178–184.
20. **Mishra M. K. and Pal B. K.** Improving blasting efficiency by minimizing secondary blasting, *Indian Min. Eng. J.*, 1996. — P. 31–33.

21. **Brahma K. C. and Pal B. K.**, An application of regression model for evaluation of blast vibration in an opencast coal mine – a case analysis, 2005, Vol. 1, No. 3. — P. 106–111.
22. **Agrawal H. and Mishra A. K.** Modified scaled distance regression analysis approach for prediction of blast-induced ground vibration in multi-hole blasting, J. Rock Mech. Geotech. Eng., 2018. doi:10.1016/J.JRMGE.2018.07.004.
23. **Peng Y., Wu, L., Chen C., Zhu, B., and Jia Q.** Study on the robust regression of the underwater drilling and blasting, Arab J. Sci. Eng., 2018, Vol. 43, No. 10. — P. 5541–5549. doi:10.1007/s13369-018-3205-3.
24. **Akande J. M. and Lawal A. I.** Optimization of blasting parameters using regression models in Ratcon and NSCE granite quarries, Ibadan, Oyo state, Nigeria, Geomaterials, 2013, Vol. 3. — P. 28–37. doi:10.4236/gm.2013.31004.
25. **Xue X. and Yang X.** Predicting blast-induced ground vibration using general regression neural network, J. Vib. Control, 2014, Vol. 20, No. 10. — P. 1512–1519. doi:10.1177/1077546312474680.
26. **Rasmussen C. E. and Williams C. K. I.** Gaussian Process for Machine Learning. The MIT Press, 2006, Vol. 14. — P. 69–106. doi:10.1142/S0129065704001899.
27. **Ambraseys N. R. and Hendron A. J.** Dynamic behavior of rock masses: rock mechanics in engineering practices, Rock Mech. In Eng. Practices, London, Wiley. — P. 203–207.
28. **Bureau of Indian Standard**, Criteria for Safety and Design of Structures Subject to Underground Blsts, New Delhi, 1973.
29. **Hoek E., Kaiser P. K., and Bawden W. F.** Rock Mass Classification, Support Undergr. Excav. Hard Rock, 1995. — P. 34–37.

Поступила в редакцию 12/VII 2019

После доработки 20/VIII 2020

Принята к публикации 29/V 2020