

## Ι ΓΕΟΜΕΧΑΗИΚΑ И ΓΕΟΤΕΧΗΟΛΟΓИЯ

#### DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.76.18.001

УДК 550.37:622.834 © В.В. Иванов, К.Х. Ли, 2021

### В.В. ИВАНОВ

д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово, e-mail: v.ivanov@nc-vostnii.ru

#### К.Х. ЛИ



научный сотрудник AO «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово e-mail: chiterzzz@mail.ru

## КИНЕТИКО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДГОТОВКИ ГОРНЫХ УДАРОВ НА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ И НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ ИХ ПРОГНОЗА

Рассмотрена двухстадийная кинетико-статистическая модель подготовки горных ударов, разработанная на основе кинетической теории прочности С.Н. Журкова. Приведены основные уравнения модели, которые пригодны для применения на любых масштабных уровнях разрушения (для сейсмических событий любого энергетического класса). Показаны примеры прогноза даты горного удара по сейсмическим предвестникам, которые подтверждают применимость предложенной модели для описания кинетики подготовки горных ударов.

Ключевые слова: ГОРНЫЙ УДАР, КИНЕТИКА ПОДГОТОВКИ, КИНЕТИКО-СТАТИ-СТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ПРОГНОЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ.

Разрушение блоковых структур массивов горных пород любого уровня является следствиемпроцессанакопленияповреждений меньшего размера. На этот процесс оказывает множество различных горновлияние геологических и горнотехнических факторов. Процесс накопления трещин в естественных условиях является квазистационарным случайным процессом, при этом периоды стационарности описываются пуассоновским распределением, когда вероятность появления m событий за время ∆t находится следующим образом [1-4]:

$$P(\xi(\Delta t) = m) = \frac{(\lambda \Delta t)^m}{m!} e^{-\lambda \Delta t}, \qquad (1)$$

где λ — среднее число трещин, возникающих в единице объема за единицу времени.

Интенсивность случайного потока трещин оценивается с помощью кинетико-статистической двухстадийной модели С.Н. Журкова, уточненной В.В. Ивановым [1, 2]:

$$\lambda(t) = \frac{N^*}{\tau_0} \exp\left[\frac{\gamma \sigma(t) - U_0}{kT}\right],$$
 (2)

где  $\sigma$  — интенсивность действующих касательных напряжений;  $\tau_0 \cong 10^{-13}$  — период тепловых атомных колебаний, с.;  $U_0$ ,  $\gamma$  константы материала и условий нагружения; T — абсолютная температура материала; k — постоянная Больцмана. Разрушение

блока происходит при выполнении концентрационного критерия [6]:

$$\frac{\left(N^{*}\right)^{-1/3}}{L_{0}} = K \approx 3,$$
(3)

где  $N^*$  — критическая концентрация трещин;  $L_0$  — средний линейный размер трещин на данном иерархическом уровне разрушения. Формулы (1)–(3) положены в основу кинетико-статистической модели разрушения для любых условий нагружения и **любых масштабных уровней разрушения** [1, 2] (от образцов горных пород до крупных структурных блоков земной коры). При этом долговечность материала определяется из условия необратимости накопления повреждений Робинсона–Бейли [1–3]:

$$\int_{0}^{\tau} \frac{dt}{\tau[\sigma(t)]} = 1, \qquad (4)$$

которое в контексте вышеизложенного записывается следующим образом [2]:

$$\int_{0}^{\tau} \dot{N}dt = \int_{0}^{\tau} \frac{N^{*}}{\tau_{0}} \exp\left[\frac{\gamma\sigma(t) - U_{0}}{kT}\right] dt = N^{*},$$
(5)

где  $\tau$  — долговечность материала под нагрузкой;  $\lambda(t) = \dot{N}$  — скорость трещинообразования;  $\tau_0$  — период тепловых атомных колебаний. Из уравнения (5) при постоянных температуре и напряжениях немедленно вытекает уравнение Журкова С.Н.

На всех стадиях разрушение горных пород сопровождается акустической эмиссией (далее АЭ) и электромагнитным излучением (далее ЭМИ) [2] в очень широком диапазоне частот. Электромагнитные и акустические предвестники используются для прогноза разрушения участков массива горных пород по следующей схеме.

На удароопасном участке массива выбирается пространственное окно с размерами, примерно на порядок превышающими размер готовящегося очага разрушения. Связь энергии прогнозируемого события (в джоулях) с размерами очага (в метрах) можно определить по эмпирической формуле К. Касахары [7]:

6

$$\lg L = 0,33 \lg W - 0,4,\tag{6}$$

где *L* — линейный размер очага, м; *W* — энергия прогнозируемого события, Дж.

Участки массива, опасные по горным ударам, можно выделить на ранних стадиях по следующим параметрам:

 потенциалу квазистационарного электрического поля;

- повышенному уровню ЭМИ;

– аномально высоким значениям импульсов акустической эмиссии, ЭМИ и т. п.

Породы на таких участках хрупкие и имеют ряд других нестандартных свойств.

Поскольку отношение энергий двух соседних иерархических уровней разрушения составляет примерно четыре порядка, по выбранной энергии W прогнозируемого события легко определить энергию предвестников и размер трещин, кинетику которых необходимо отслеживать в процессе мониторинга участка массива. Например, прогноз события с энергией 10<sup>5</sup> Дж осуществляют по кинетической кривой накопления событий с энергией 10<sup>1</sup> Дж, что соответствует размеру образующихся трещин  $L_0 \approx 0,9$  м [2].

Для интерпретации этих данных была составлена таблица 1, в которой приведены иерархические уровни разрушения и соответствующая им выделяемая энергия.

По заданному размеру  $L_0$  и концентрационному критерию разрушения (3) определяется критическое число  $N^*$  трещин — предвестников полного разрушения в контролируемом объёме.

Для решения реальной задачи прогноза горных ударов проведём некоторые упрощения. Обозначим

$$U_* = \frac{U(\sigma)}{kT},\tag{7}$$

где  $U(\sigma)$  — функция состояния горной породы в массиве [2].

Тогда найденная методом наименьших квадратов оценка для  $U^*$  будет выглядеть следующим образом:

$$U^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{N^* \Delta t_i}{\tau_0 N_i}\right),\tag{8}$$

Условие необратимости накопления повреждений Робинсона-Бейли (4) можно

записать в виде:

$$\sum_{i=1}^{n} \int_{t_{i-1}}^{t_{i}} \frac{N^{*}}{\tau_{0}} \exp(U_{i}^{*}) dt + \int_{t_{n}}^{\tau} \frac{N^{*}}{\tau_{0}} \exp(U_{n}^{*}) dt = N^{*}$$
(9)

Таблица 1

Размер трещины (линейный размер очага разрушения или очага горного удара), L, м	Сейсмическая энергия, выделяемая при разрушении горных пород, W, Дж
0,04	10 <sup>-3</sup>
0,86	10
1,82	10 <sup>2</sup>
3,89	10 <sup>3</sup>
8,31	104
18,6	105
39,8	10 <sup>6</sup>
85,3	107
183,6	10 <sup>8</sup>
397,8	10 <sup>9</sup>

Иерархия структур в массиве горных пород [2]

В таблице 2 предполагается, что последняя найденная оценка  $U_n^*$  остаётся неизменной до полного разрушения материала. Но, так как наблюдение ведётся непрерывно, то и оценка  $U^*$ постоянно уточняется, отражая все изменения, происходящие в контролируемом блоке массива горных пород. Из (9) находим оценку даты горного удара на момент времени  $t_n$  на основании оценок  $U_n^*$  в предыдущих п (n  $\geq$  2) точках [2]

$$\tau = t_n + \left[\tau_0 \exp\left(U_n^*\right) - \exp\left(U_n^*\right) \sum_{i=1}^n \exp\left(-U_i^*\right) \Delta t_i\right], (10)$$

что позволяет получить реальную оценку времени наступления динамического явления по непосредственным наблюдениям за процессом трещинообразования.

На Таштагольском месторождении сейсмические наблюдения проводятся сейсмостанцией «Таштагол». На основе анализа данных с этой сейсмостанции была проведена опытная проверка вышеизложенных принципов.

Для решения проблемы долгосрочного хранения и удобного доступа к данным сейсмостанции Пимоновым А.Г. разработана статистическая [5] автоматизированная dBASE-совместимая база данных «SEISMIC», в которой хранится информация о дате, времени, координатах и величине энергии событий, регистрируемых сейсмостанцией (табл. 2). Автоматизированная база данных «SEISMIC» разрабатывалась, главным образом, для статистической обработки хранящейся в ней информации с целью изучения процесса подготовки горных ударов, но, благодаря своей открытости и возможности бесконечного усовершенствования, может быть использована и для сейсмологического мониторинга в рамках программы по обеспечению сейсмобезопасности Кузбасса.

Сформулированные принципы прогноза реализованы в программном обеспечении АБД «SEISMIC» [3, 4], с помощью которого был проведён ретроспективный анализ и прогноз горных ударов по каталогу наблюдений сейсмостанции Таштагольского рудоуправления.

Таблица 3 содержит предвестники горного удара (27.03.94) с энергией W = 10<sup>5</sup> Дж, а результаты ретроспективного прогноза приведены на рис. 1.

Аналогичные результаты получаются и при прогнозировании событий большего энергетического уровня (рис. 2).

Таким образом, приведённые данные свидетельствуют об удовлетворительной точности прогноза горных ударов по сейсмическим предвестникам и правильности предложенной кинетико-статистической модели, сформулированной в работах [2, 4]. По мере накопления информации прогноз становится всё более точным вследствие приближения теоретической кривой накопления событий к экспериментальной.

Как видно из приведенных данных, реше-

ние задачи прогноза горных ударов требует точного определения координат предвестников в массиве. До середины девяностых годов прошлого века эту задачу решала система сейсмоакустического контроля, которая включала в себя стационарную сейсмостанцию на земной поверхности, датчики акустической эмиссии, размещаемые под землей в массиве горных пород Таштагольского рудника, а также проводную систему связи подземных павильонов с сейсмостанцией.

Таблица 2

№ п/п	Содержимое поля	Имя поля	Тип	Длина	Дробная часть
1	Дата сейсмического события	Day_Se	Date	8	—
2	Часы	НН	Numeric	2	0
3	Минуты	MM	Numeric	2	0
4	Секунды	SS	Numeric	2	0
5	Координата Х	Х	Numeric	5	0
6	Координата Ү	Υ	Numeric	5	0
7	Координата Z	Z	Numeric	4	0
8	Мантисса энергии	E_mnt	Numeric	4	2
9	Характеристика энергии	E_chr	Numeric	1	0

#### Структура АБД «SEISMIC» [5]

Таблица 3

Сейсмические предвестники толчка (27.03.1994) с энергией W=10<sup>5</sup> Дж

№ п/п	Дата, дд.мм.гг	Время, чч:мм:сс	Энергия, Дж	Расстояние до ближайшего соседа, м
1	21.11.93	12:20:00	1,60.10⁵	79,1
2	17.01.94	15:28:27	5,97·10 <sup>1</sup>	94,5
3	23.01.94	06:10:16	8,56·10 <sup>1</sup>	101,8
4	03.02.94	03:20:06	5,50·10 <sup>1</sup>	99,6
5	11.02.94	10:45:48	5,50·10 <sup>1</sup>	101,8
6	11.02.94	12:57:55	7,00·10 <sup>1</sup>	23,6
7	11.02.94	15:22:17	9,70·10 <sup>1</sup>	23,6
8	13.02.94	20:44:49	7,50·10 <sup>1</sup>	46,4
9	16.02.94	05:07:25	6,99·10 <sup>1</sup>	57,7
10	20.02.94	01:07:07	5,50·10 <sup>1</sup>	198,1
11	20.02.94	01:17:16	5,50·10 <sup>1</sup>	58,2
12	24.02.94	15:58:41	1,70·10 <sup>1</sup>	57,7
13	24.02.94	19:49:08	1,10·10 <sup>1</sup>	113,4
14	25.02.94	06:11:05	6,22·10 <sup>1</sup>	284,3
15	28.02.94	14:18:33	3,99·10 <sup>1</sup>	154,0
16	07.03.94	02:29:59	9,68·10 <sup>1</sup>	58,2

№ п/п	Дата, дд.мм.гг	Время, чч:мм:сс	Энергия, Дж	Расстояние до ближайшего соседа, м
17	07.03.94	03:58:02	8,72·10 <sup>1</sup>	109,9
18	13.03.94	01:05:02	5,50·10 <sup>1</sup>	109,9
19	15.03.94	11:44:19	1,79·10 <sup>1</sup>	40,1
20	21.03.94	15:32:05	3,70·10 <sup>1</sup>	94,5
21	21.03.94	16:45:22	9,30·10 <sup>1</sup>	40,1
22	22.03.94	15:19:18	9,68·10 <sup>1</sup>	99,6
23	23.03.94	14:15:32	5,50·10 <sup>1</sup>	53,8
24	27.03.94	00:00:50	1,00·10 <sup>5</sup>	53,8



Рис. 1. Прогноз толчка (27.03.1994) с энергией W = 10<sup>5</sup> Дж (1 — прогнозируемое время до разрушения, 2 — ошибка прогноза) [5]. Текущее время измеряется в сутках



Текущее время измеряется в сутках

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.В., Егоров П.В., Пимонов А.Г. Статистическая теория эмиссионных процессов в нагруженных структурно-неоднородных горных породах и задача прогнозирования динамических явлений // ФТПРПИ. 1990. № 4. С. 59–65.

2. Иванов В.В. Физические основы электромагнитных процессов при формировании очага разрушения в массиве горных пород: дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук / Вадим Васильевич Иванов. Кемерово, 1994. 366 с.

3. Пимонов А.Г. Статистическое моделирование и прогноз разрушения горных пород в очагах горных ударов: дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук / Александр Григорьевич Пимонов. Кемерово, 1997. 312 с.

4. Пимонов А.Г., Егоров П.В., Иванов В.В. Статистическое моделирование и прогноз разрушения горных пород в очагах горных ударов. Кемерово, 1997. 178 с.

5. Пимонов А.Г. Применение технологии автоматизированных баз данных для хранения и статистической обработки сейсмической информации // Информационные технологии в горной промышленности. Кемерово, 1996. С. 87–91.

6. Гор А.Ю., Куксенко В.С., Томилин Н.Г. Концентрационный порог разрушения и прогноз горных ударов // ФТПРПИ. 1989. № 3. С. 54–60.

7. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.

### DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.76.18.001

UDC 550.37:622.834 © V.V. Ivanov, K.Kh. Lee, 2021

#### V.V. IVANOV

Doctor of Engineering Sciences, Professor Leading Researcher JSC «NC VostNII», Kemerovo e-mail: v.ivanov@nc-vostnii.ru

K.Kh. LEE Researcher JSC «NC VostNII», Kemerovo e-mail: chiterzzz@mail.ru

# KINETIC-STATISTICAL MODEL OF PREPARATION OF ROCK IMPACTS AT IRON ORE DEPOSITS AND SOME EXAMPLES OF THEIR FORECAST

A two-stage kinetic-statistical model of the preparation of rock bursts, developed on the basis of the kinetic theory of strength by S.N. Zhurkov. The basic equations of the model are given, which are suitable for use at any scale levels of destruction (for seismic events of any energy class). Examples of forecasting the date of a rock burst based on seismic precursors are shown, which confirm the applicability of the proposed model for describing the kinetics of rock burst preparation.

Keywords: ROCK IMPACT, KINETICS OF PREPARATION, KINETIC-STATISTICAL MODEL, FORECAST OF SEISMIC EVENTS.

#### REFERENCES

1. Ivanov V.V., Egorov P.V., Pimonov A.G. Statistical theory of emission processes in loaded structurally inhomogeneous rocks and the problem of predicting dynamic phenomena // Physical and

technical problems of mining [Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh]. 1990. No. 4. P. 59–65. [In Russ.].

2. Ivanov V.V. Physical foundations of electromagnetic processes in the formation of a source of destruction in a rock mass: dissertation for the degree of Doctor of Engineering Sciences / Vadim Vasilievich Ivanov. Kemerovo, 1994. 366 p. [In Russ.].

3. Pimonov A.G. Statistical modeling and prediction of the destruction of rocks in the foci of rock bumps: dissertation for the degree of Doctor of Engineering Sciences / Alexander Grigorievich Pimonov. Kemerovo, 1997. 312 p. [In Russ.].

4. Pimonov A.G., Egorov P.V., Ivanov V.V. Statistical modeling and prediction of the destruction of rocks in the foci of rock bumps. Kemerovo, 1997. 178 p. [In Russ.].

5. Pimonov A.G. Application of automated database technology for storing and statistical processing of seismic information // Information technologies in mining industry [Informatsionnyye tekhnologii v gornoy promyshlennosti]. Kemerovo, 1996. P. 87–91. [In Russ.].

6. Gor A.Yu., Kuksenko V.S., Tomilin N.G. Concentration threshold of destruction and forecast of rock bursts // Physical and technical problems of mining [Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh]. 1989. No. 3. P. 54–60. [In Russ.].

7. Kasahara K. Mechanics of earthquakes. M.: Mir, 1985. 264 p. [In Russ.].