

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Е.Е. Разумов^{1,2}, С.М. Простов¹, С.Н. Мулёв², Г.Д. Рукавишников²

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
Кемерово, Россия, e-mail: razumov@vnimi.ru

² АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики
и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр ВНИМИ»,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Приведен анализ методов обработки сейсмической информации при функционировании шахтных систем геомониторинга. Подобные системы эффективно используются на угледобывающих предприятиях США, Канады, ЮАР, Великобритании, Австралии и других стран. Опыт создания и эксплуатации таких систем накоплен на горнодобывающих предприятиях Кузбасса, Воркуты, Норильска, Таштагола с использованием аппаратуры отечественных и зарубежных производителей (системы «GITS», АС «РЕЛСС», «ISS», «АСКМ», «Прогноз-ADS» и др.). Для обработки сейсмической информации и эффективной ее интерпретации используется целый ряд методов: кластерный анализ; нейронные сети; системный анализ и синтез, обеспечивающие синергический эффект; многоуровневая иерархия, комплексирование сейсмического мониторинга с деформационным, геодезическим, электрофизическим, межскважинной томографией; спектральный анализ сейсмограмм; отстройка от фонового влияния при малом уровне сигнала; исследование волн маятникового типа. Основными базовыми параметрами, характеризующими геодинамическое состояние массива, являются координаты очагов сейсмического сигнала, интенсивность сейсмической активности и энергия сейсмособытий. Разработаны алгоритмы локации источника сейсмособытия, основанные на циклическом подборе координат расчетной точки путем минимизации показателя, вычисляемого по разности фактических и расчетных задержек приходов сейсмоволны, а также минимизации целевой функции методом адаптивного случайного поиска с использованием генератора случайных чисел (Монте-Карло). В качестве комплексной характеристики сейсмической активности массива предложен показатель F , включающий отношение энергии текущего сейсмического события к фоновому уровню и суммарную сейсмическую активность за расчетный интервал времени. Методом факторного анализа установлены зависимости показателя F от ряда функциональных параметров: линейного размера объемной расчетной матрицы, которой представляется реальный массив; шага приращения линейного размера; временного интервала.

Ключевые слова: сейсмический мониторинг, локация очага, энергия сейсмособытия, сейсмоактивность, геодинамическое состояние массива, циклический алгоритм, адаптивный случайный поиск, минимизация целевой функции, факторный анализ.

Для цитирования: Разумов Е. Е., Простов С. М., Мулёв С. Н., Рукавишников Г. Д. Алгоритмы обработки сейсмической информации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 2. – С. 17–29. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_17.

Seismic information processing algorithms

E.E. Razumov^{1,2}, S.M. Prostov¹, S.N. Mulev², G.D. Rukavishnikov²

¹T. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia, e-mail: razumov@vnimi.ru

²Research Institute of Mining Geomechanics & Mine Surveying (VNIMI), Saint-Petersburg, Russia

Abstract: The seismic information processing methods in mine geomonitring systems are reviewed. Geomonitring is effectively used in coal mines in USA, Canada, South Africa, Great Britain, Australia and many other countries. Implementation and operation of geomonitring systems in mines in Kuzbass, Vorkuta, Norilsk and Tashtagol used equipment of Russian and foreign manufacture (GITS, RELLS, ISS, ASKM, Prognoz-ADS etc.). Processing and effective interpretation of seismic data can use: cluster analysis, neural networks, system-analysis and synthesis toward synergistic effect, multilevel hierarchy, complexing of seismic monitoring with deformation, geodetic and electrophysical observations and crossborehole tomography, spectral analysis of seismograms, tuning-out of background effects at weak signals and pendulum wave studies. The main characteristics of the geodynamic behavior of rock mass are the coordinates of a seismic signal source, the intensity of seismic activity and the energy of seismic event. The developed algorithms of the seismic event source location are based on the cyclic selection of the coordinates of a reference point by minimizing the value of difference between the actual and theoretical delays of seismic wave arrivals and by minimizing the objective function by the adaptive random search using the random number generator (Monte-Carlo method). The integrated characteristic of seismic activity in rock mass is proposed to be the index F which integrates the ratio of current and background energies of a seismic event and the total seismic activity in the estimated period of time. The factor analysis determines the F index as function of: the linear size of 3D analysis matrix representing real-life rock mass; the increment in this linear size; the time interval.

Key words: seismic monitoring, source location, seismic event energy, seismic activity, geodynamic behavior of rock mass, cyclic algorithm, adaptive random search, objective function minimization, factor analysis.

For citation: Razumov E. E., Prostov S. M., Mulev S. N., Rukavishnikov G. D. Seismic information processing algorithms. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(2):17-29. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_17.

Введение

Необходимость в создании современных систем мониторинга геодинамических процессов, происходящих в массиве горных пород, обусловлена как природными, так и техногенными факторами. Интенсивный рост добычи угля ведет к увеличению глубины его выемки, в связи с этим — к усложнению геомеханических и газодинамических условий ведения горных работ. В настоящее

время имеется обширная практика построения систем сейсмического мониторинга, эффективно используемых на угольных предприятиях США, Канады, ЮАР, Великобритании, Австралии и других стран.

Богатый опыт создания и эксплуатации таких систем накоплен и отечественной горнодобывающей промышленностью (предприятия Кузбасса, Воркуты, Норильска, Таштагола и др.). При их соз-

дании используется аппаратура как отечественных, так и зарубежных производителей (системы «GITS», АС «РЕЛСС», «ISS», «АСКМ», «Прогноз-ADS» и др.) [1, 2].

Одной из основных задач систем мониторинга массива горных пород является прогнозирование газодинамических и геодинамических явлений, таких как вывалы горной массы, внезапные выбросы породы и газа, горных ударов, а также геологических нарушений массива горных пород, зон трещиноватости [3]. Геодинамические явления относятся к быстротекущим процессам, следовательно, являются сложнопрогнозируемыми. Для геодинамического прогнозирования используются различные методы анализа, такие как корреляционный, регрессионный, факторный, вариационный и спектральный. Совместное применение методов экстраполяции и нейросетевых технологий при прогнозировании быстротекущих событий позволяет в зависимости от интервала прогноза оперативно выбирать наиболее подходящий метод при заданной входной выборке временного ряда геодинамических событий [4].

Создание многоуровневой системы комплексного геодинамического мониторинга (геодинамического полигона), которая бы объединяла целый ряд методов (сейсмический, деформационный, геоакустический, геодезический, тектонофизический) и измерительных комплексов в единую интегрированную наблюдательную сеть обусловлено следующими факторами: выделение региональных и локальных предвестников динамических явлений разного энергетического уровня в массивах горных пород и обоснование комплекса мер по эффективному освоению месторождений полезных ископаемых с учетом геодинамических и техногенных процессов [5–8]. В работе [9] описана многоуровневая система,

реализованная на месторождениях ОАО «ППГХО». Она включает следующие основные элементы: автоматизированную геоакустическую систему контроля горного давления «Prognoz ADS», которая позволяет регистрировать и определять параметры событий акустической эмиссии в частотном диапазоне 0,5–12 кГц; систему микросейсмического мониторинга «Prognoz S», регистрирующую сейсмоакустические события в частотном диапазоне от 10 до 1000 Гц; длинноволновый лазерный деформометр, предназначенный для измерения характеристик деформационного поля в зоне ведения горных работ в частотном диапазоне от 0 до 100 Гц; многоканальную систему деформационных наблюдений и некоторые другие технические средства. Благодаря применению многоуровневой системы геодинамического мониторинга увеличилось количество и качество получаемой информации о состоянии массива.

Сейсмические исследования, выполненные на ряде подземных рудников, показали связь напряженного состояния локальных зон со спектральными параметрами нелинейных колебаний. На основании анализа спектров сейсмических волн, распространяющихся в локально-напряженных зонах, сформированных низкомодульными неоднородностями, сделан вывод о том, что характер пространственного распределения ультрагармоник сейсмических колебаний близок к характеру распределения напряжений, сформированных в окрестности тектонических нарушений, а градиент частоты ультрагармоник отражает изменение напряженного состояния горных пород в окрестности тектонических нарушений [10].

Целью работы является совершенствование алгоритмов локации очагов сейсмособытий, а также экспериментальное обоснование информативного

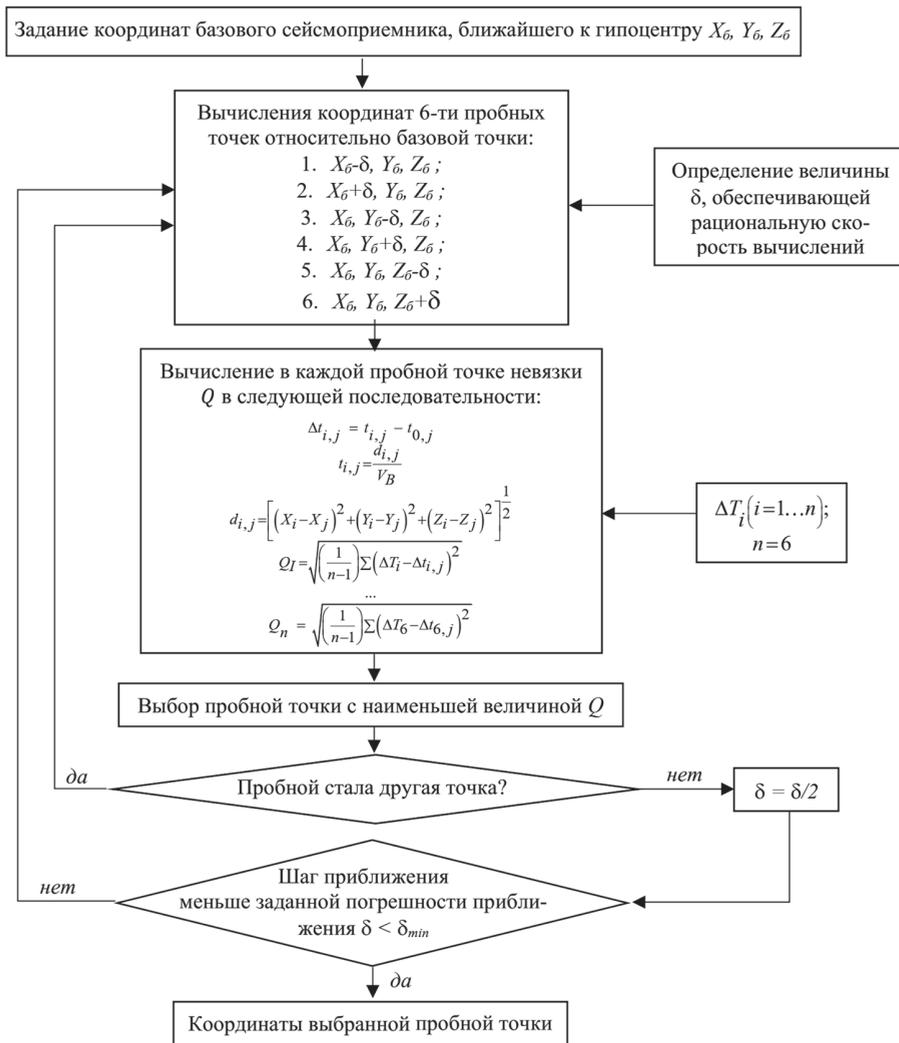


Рис. 1. Алгоритм расчета координат источника сейсмического события методом SPAM: δ – приращение координаты, рациональное по критерию времени счета; $\Delta t_{i,j}$ – задержка прихода сейсмической волны от j -го вычисленного источника (ВИ) до i -го приемника относительно прихода сейсмической волны от того же j -го ВИ до ближайшего к нему сейсмоприемника; $t_{i,j}$ – время прихода сейсмической волны от j -го ВИ до i -го приемника; $t_{0,j}$ – рассчитанное время прихода сейсмической волны от j -го ВИ до ближайшего к нему приемника; $d_{i,j}$ – рассчитанное расстояние между j -м ВИ и i -м приемником; X_i, Y_i, Z_i – координаты i -го приемника; X_j, Y_j, Z_j – координаты j -го ВИ; ΔT_i – фактическая задержка прихода сейсмической волны от j -го ВИ до i -го приемника относительно прихода сейсмической волны от того же j -го ВИ до ближайшего к нему сейсмоприемника; n – количество сейсмоприемников, $n = 6$; Q_j – невязка для j -го ВИ

Fig. 1. SPAM-based algorithm for coordinates of seismic event source: δ – coordinate increment which is rational by the time count criterion; $\Delta t_{i,j}$ – delay of seismic wave arrival from the j -th computed source to the i -th receiver relative to seismic wave arrival from the j -th source to the nearest receiver; $t_{i,j}$ – arrival time of seismic wave from the j -th computed source to the i -th receiver; $t_{0,j}$ – calculated arrival time of seismic wave from the j -th computed source to the nearest receiver; $d_{i,j}$ – calculated distance between the j -th computed source and the i -th receiver; X_i, Y_i, Z_i – coordinates of the i -th receiver; X_j, Y_j, Z_j – coordinates of the j -th computed source; ΔT_i – actual delay of seismic wave arrival from the j -th computed source to the i -th receiver relative to seismic wave arrival from the j -th computed source to the nearest receiver; n – number of seismic receivers, $n = 6$; Q_j – closure error for the j -th computed source

энергетического критерия сейсмической активности потенциально удароопасного массива горных пород и его зависимости от режимов обработки сейсмосигнала.

Методика проведения исследований

Во ВНИМИ разработана система сейсмического мониторинга GITS (Geo Info Trans System) — геофизическая информационно-передающая система, представляющая собой программно-технический комплекс для непрерывного регионального контроля за шахтным полем с выявлением зон активации геомеханических процессов в массиве горных пород с помощью системы микросейсмических датчиков. Программное обеспечение системы направлено на решение следующих задач: определение координат и сейсмической энергии событий; ведение каталога событий; построение карт сейсмической активности; построение карт очагов; статистический анализ сейсмической активности при различных начальных условиях с построением графиков и таблиц; построение сводных таблиц за различные интервалы времени и по разным участкам контролируемого массива горных пород [11].

Алгоритмы обработки сейсмической информации разработаны с использованием методов геолокации и опыта прогноза геодинамических явлений в шахтах.

Алгоритмы определения координат сейсмических событий реализуются с помощью двух методов: точечной локации для 6 датчиков (SPAM) и наименьших квадратов.

Алгоритм SPAM реализует циклический подбор координат расчетной (опытной) точки — источника сейсмосигнала с наименьшей величиной невязки Q между фактическими и расчетными задержками прихода сейсмоволны.

Алгоритм расчета методом SPAM представлен на рис. 1.

Основные этапы расчета состоят в следующем: задание координат базового сейсмоприемника, ближайшего к гипоцентру; вычисление координат пробных точек относительно базовой; вычисление Q для всех пробных точек; циклический выбор пробной точки с минимальной величиной Q с заданным минимальным шагом приращения координат.

Алгоритм метода наименьших квадратов основан на предположении, что скорость сейсмосигнала постоянна в различных направлениях. Алгоритм этого метода расчета приведен на рис. 2.

Алгоритм включает два основных этапа:

- формирование системы нелинейных расчетных уравнений;
- определение координат точки сейсмосигнала X, Y, Z методом наименьших квадратов путем минимизации функции Φ .

Поиск минимума функции Φ реализуется методом адаптивного случайного поиска (имитации отжига [14, 15]) с использованием генератора случайных чисел $rand[-1;1]$, при этом приемлемая погрешность расчета Δ обеспечивается при числе циклов более 27.

Первый цикл минимизации позволяет приближению определить минимум функции Φ при коэффициенте расширения

$$\alpha = \frac{\sqrt{5} + 1}{2},$$

во втором цикле минимум функции вычисляется с заданной точностью при коэффициенте сжатия

$$\beta = \frac{\sqrt{5} - 1}{2}.$$

Энергетической характеристикой события является сейсмическая энергия, т.е. та часть полной энергии очага, которая приходится на образование упру-

гих колебаний и их распространение в массиве горных пород. Для вычисления сейсмической энергии E путем прямого расчета используют классическую зависимость [12, 13] (в Дж):

$$E = 2\pi R^2 \rho \left(\sum V_p A_p^2 \tau_p + \sum V_s A_s^2 \tau_s \right), \quad (1)$$

где R – гипоцентральное расстояние, м; ρ – плотность среды т/м³; V_p, V_s – скорости продольной и поперечной волны, м/с;

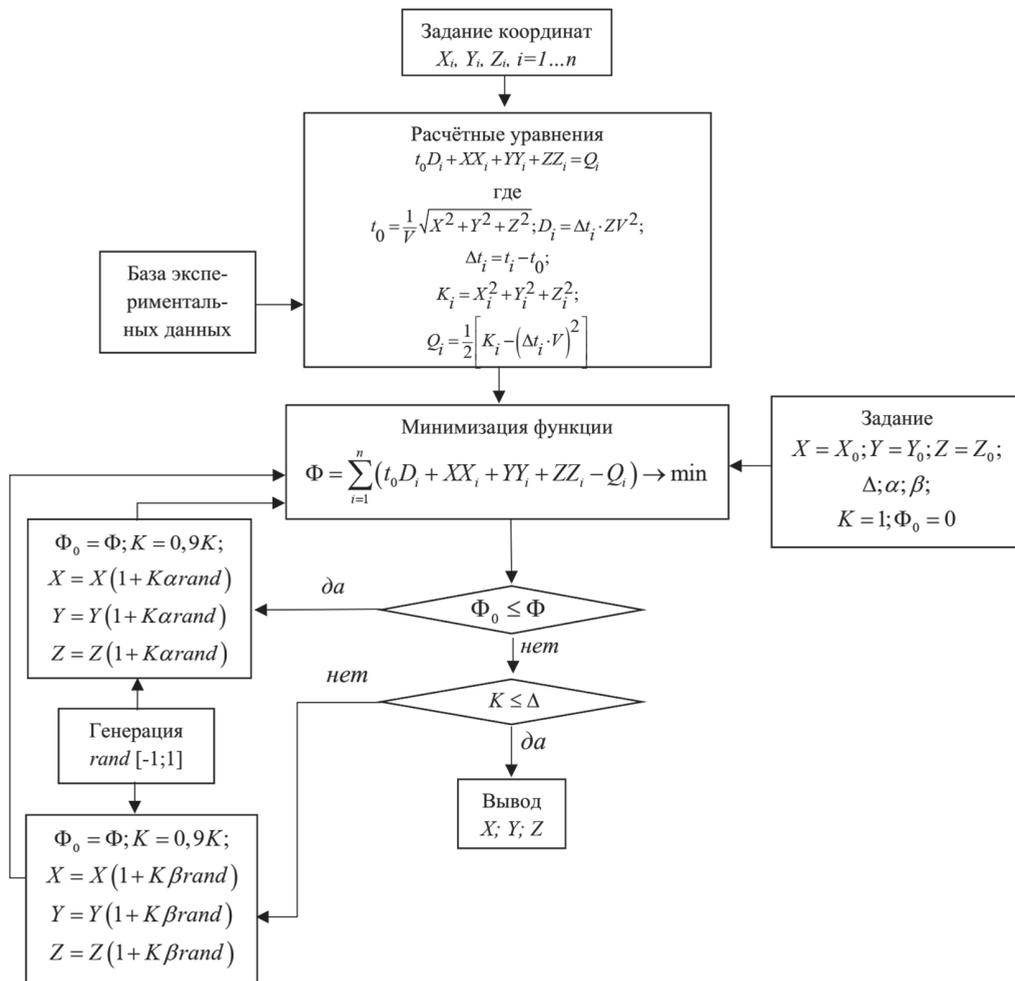


Рис. 2. Алгоритм метода наименьших квадратов: X, Y, Z – координаты очага; X_p, Y_p, Z_p – координаты i -го сейсмоприемника; t_0 – время прихода сигнала от очага до сейсмоприемника с координатами X_{op}, Y_{op}, Z_{op} ; t_i – время прихода сигнала от очага до i -го сейсмоприемника; V – скорость волны; Δt_i – измеренные величины задержки сигнала; n – число сейсмопавильонов, участвующих в вычислениях; Δ – заданная погрешность расчета; K – коэффициент сдвига расчетной точки; α – коэффициент расширения; β – коэффициент сжатия

Fig. 2. Least square method algorithm: X, Y, Z – coordinates of source; X_p, Y_p, Z_p – coordinates of the i -th receiver; t_0 – arrival time of signal from the source to a receiver with coordinates X_{op}, Y_{op}, Z_{op} ; t_i – arrival time of signal from source to the i -th receiver; V – wave velocity; Δt_i – measured delays of signal; n – number of seismic sets included in calculation; Δ – preset computation error; K – displacement factor of reference point; α – expansion ratio; β – compression ratio

A_p, A_s — амплитуды колебаний продольной и поперечной волн, м/с; τ_p, τ_s — длительность цуга колебаний продольной и поперечной волн, с.

Использовать уравнение (1) в программных расчетах проблематично, поскольку большинство входящих параметров невозможно измерить с достаточной точностью. Практика сейсмомониторинга показывает, что в результате обработки баз данных большого числа сейсмических явлений может быть получена корреляционная зависимость величины сейсмической энергии от длительности записи:

$$\lg E = A + C \cdot \lg \tau, \quad (2)$$

где τ — полная длительность записи по сейсмограмме, мс; A, C — эмпирические постоянные.

Для условий ш. Комсомольская (АО «Воркутауголь»), коэффициенты A и C соответственно составляют $A = 2,24$ и $C = 2,76$.

Построение зон удароопасности целесообразно вести на основе критерия F ,

комплексно характеризующего вероятность динамического проявления:

$$F = D_k + N_k, \quad (3)$$

где k — номер ячейки — объема массива, в котором производится расчет; D_k — суммарная сейсмическая деформация; N_k — количество сейсмических событий за ΔT суток.

Слагаемые правой части уравнения (3) определяют следующим образом:

$$D_k = \sum_1^{\Delta T} D_i, \quad (4)$$

где D_i — сейсмическая деформация текущего сейсмического события; ΔT — расчетный интервал времени регистрации;

$$D_i = \frac{E_i}{E_\Phi}, \quad (5)$$

E_i — энергия текущего сейсмического события; E_Φ — фоновая энергия (минимальный уровень энергии, фиксируемый за время наблюдений);

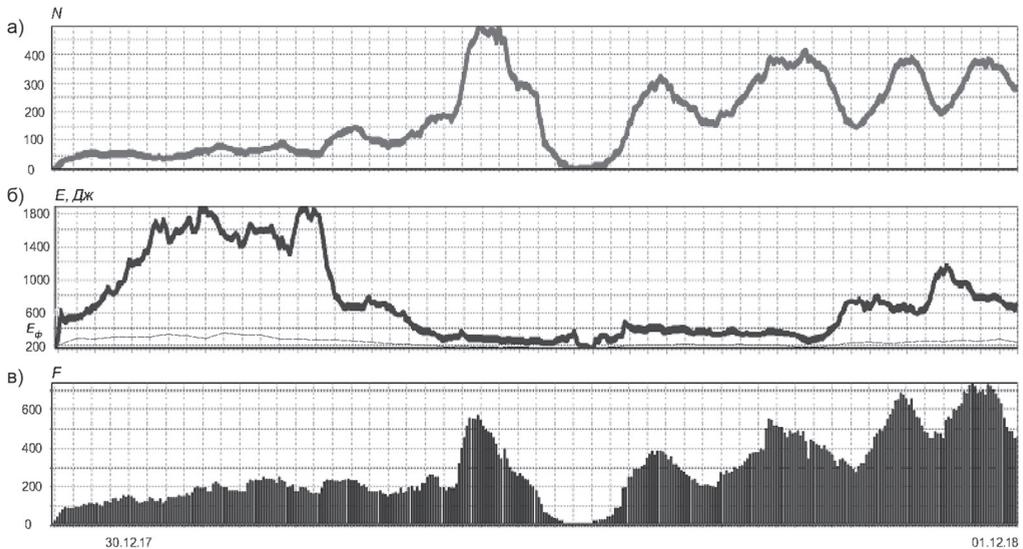


Рис. 3. Графики изменения во времени сейсмической активности для всего шахтного поля шахты «Комсомольская» за период с 01.12.2017 по 01.12.2018, $N(a)$, \bar{E} (б), $F(b)$

Fig. 3. Time history of seismic activity in Komsomolskaya Mine between 1 December 2017 and 1 December 2018: $N(a)$, \bar{E} (b), $F(c)$

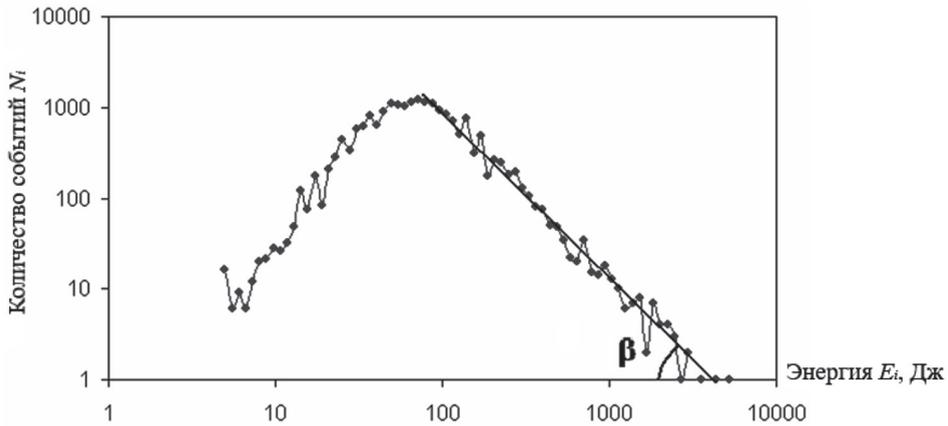


Рис. 4. График распределения количества событий N_i по энергиям E_i
 Fig. 4. Graph of distribution of number N_i and energy E_i of seismic events

Суммарную сейсмическую активность N_k событий за интервал времени ΔT определяют по формуле

$$N_k = \sum_1^{\Delta T} N_i. \quad (6)$$

Пример определения параметров N_i , E_i , E_ϕ , F для условий шахты «Комсомольская» АО «Воркутауголь» приведен на рис. 3.

Для учета свойств массива по способности накопления упругой энергии в соответствии с законом Гутенберга-Рихтера полученную величину F делят на значение B :

$$B = tg\beta \quad (7)$$

где β — угол наклона графика распределения $N_i(E_i)$, построенного в билогарифмическом масштабе (рис. 4).

Результаты

Значения параметра F зависят от нескольких постоянных, определяемых эмпирическим путем:

L — линейный размер объемной матрицы — ячейки, на которые разбивается массив горных пород, имеющий вид параллелепипеда с высотой, равной разнице минимальной и максимальной глу-

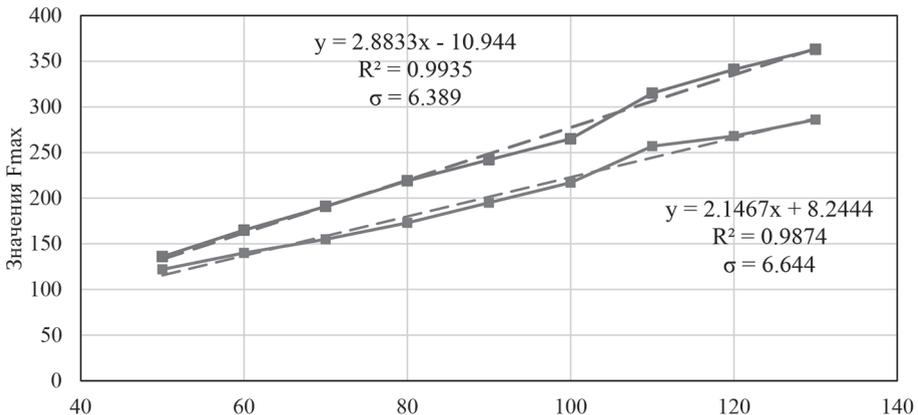


Рис. 5. График зависимости F_{max} от L : 1 — при $\Delta T = 0,2$ сут.; 2 — при $\Delta T = 30$ сут.
 Fig. 5. Plot of F_{max} versus L : 1 — at $\Delta T = 0.2$ days; 2 — at $\Delta T = 30$ days

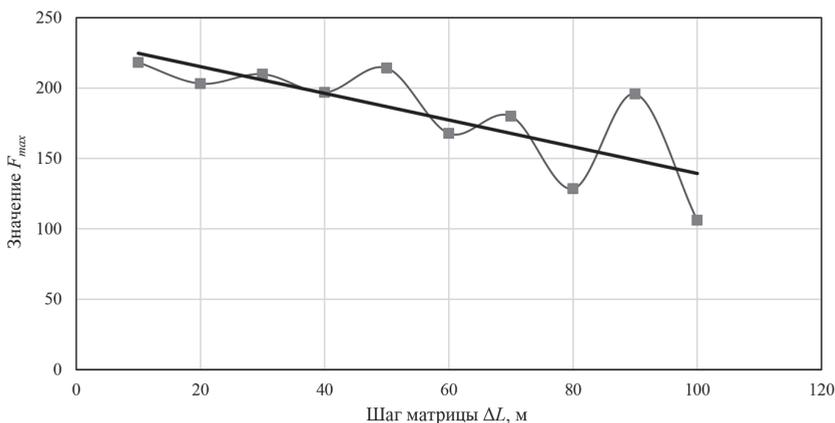


Рис. 6. График зависимости F_{max} от ΔL при $L = 100$ м

Fig. 6. Plot of F_{max} versus ΔL at $L = 100$ m

бины гипоцентров сейсмических событий;

ΔL — шаг сетки, по которой массив разбивается на ячейки;

ΔT — временной интервал в сутках, за который производится расчет F ;

α — коэффициент затухания;

E_{ϕ} — фоновая энергия.

Выполнен факторный анализ, при котором указанные выше параметры изменялись в определенных диапазонах, а остальные принимались постоянными.

На рис. 5 приведены графики зависимости максимальных значений F_{max} от параметра L для двух значений ΔT , из

которых следует, что зависимость $F_{max}(L)$ прямо пропорциональная (на рисунке указаны эмпирическая зависимость $y(x)$, коэффициент детерминации R^2 и среднее квадратическое отклонение σ).

Из графика зависимости $F_{max}(\Delta L)$ при $L = 100$ м (рис. 6) следует, что она имеет вид периодической функции с переменной амплитудой, при этом амплитуда тренда увеличивается по мере увеличения шага ΔL , т.е. чем больше шаг, тем более «размытым» получается значение F . Таким образом, шаг сетки ΔL не должен превышать половины размера матрицы, т.е. 50 м.

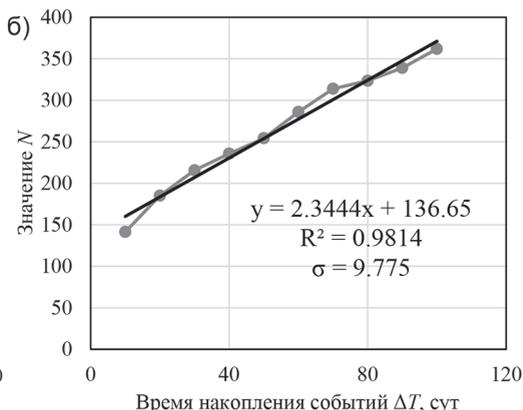
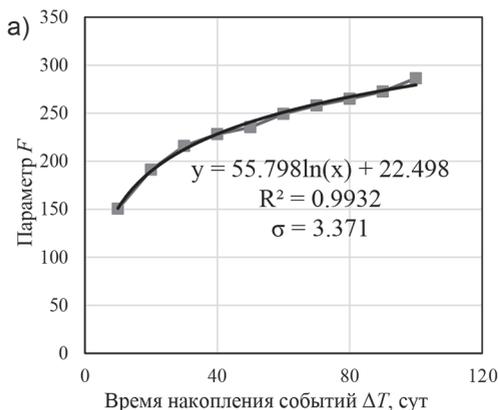


Рис. 7. График зависимости параметров F_{max} (а) и N (б) от времени накопления событий ΔT

Fig. 7. Relationship between F_{max} (a), N (b) and accumulation time ΔT of events

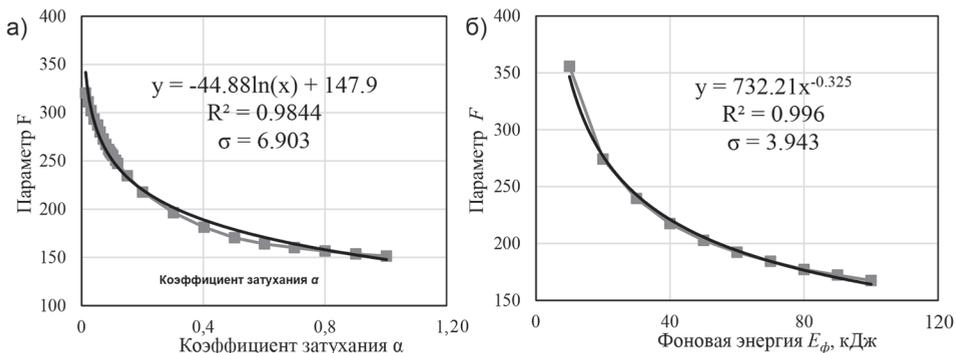


Рис. 8. График зависимостей F от α (а) и E_ϕ (б)

Fig. 8. Plot of F versus α (a) and E_ϕ (b)

При исследовании зависимости F_{\max} и N от ΔT (рис. 7) целью ставилась задача определить условие более детального выделения временных участков усиления сейсмической активности, чтобы точнее спрогнозировать момент подготовки сильного сейсмического события с максимальной энергией. Поскольку обе зависимости монотонны, интервал целесообразно принимать в диапазоне $\Delta T = 10 - 50$ сут.

Из графиков на рис. 8 следует, что зависимость $F(\alpha)$ логарифмическая, и коэффициент α имеет сильное влияние при начальных значениях до 0,3.

С увеличением фонового значения E_ϕ величина F параболически снижается.

Выводы

1. Накоплен значительный опыт в разработке и реализации систем сейсмического мониторинга для геомеханического обеспечения предприятий подземной геотехнологии, как отечественных, так и зарубежных. Для обработки сейсмической информации и эффективной ее интерпретации исследуются возможности использования целого ряда методов и подходов: кластерный анализ; нейронные сети; системные анализ и синтез, обеспечивающие синергический эффект; многоуровневая иерархия, комплексирование сейсмического мони-

торинга с деформационным, геодезическим, электрофизическим, межскважинной томографией; спектральный анализ сейсмограмм; отстройка от фонового влияния при малом уровне сигнала; исследование волн маятникового типа.

2. Основными базовыми параметрами, характеризующими геодинамическое состояние угольного пласта и вмещающих его пород по данным пассивного сейсмомониторинга, являются следующие: координаты очагов сейсмического сигнала, интенсивность сейсмической активности и энергия сейсмособытий. Остальные информационные базы (каталоги, карты, графики, таблицы и др.) реализуются с использованием стандартных программ визуализации и статистики.

3. Во ВНИМИ разработаны алгоритмы обработки сейсмической информации, реализованные в системе сейсмического мониторинга GITS. Алгоритм точечной локации источника сейсмособытия SPAM основан на циклическом подборе координат расчетной точки путем минимизации величины невязки, оцениваемой по сумме квадратов разностей между фактическими и расчетными задержками приходов сейсмоволны. Алгоритм метода наименьших квадратов включает определение ком-

понентов целевой функции и ее минимизацию методом адаптивного поиска с использованием генератора случайных чисел (Монте-Карло).

4. В качестве энергетической характеристики сейсмической активности массива предложено использовать комплексный показатель F , включающий отношение энергии текущего сейсмического события к фоновому уровню и суммарную сейсмическую активность за расчетный интервал времени.

В результате факторного анализа установлены зависимости показателя F от ряда функциональных параметров GITS: линейного размера L объемной

расчетной матрицы, которой представляется реальный массив; шага приращения ΔL ; временного интервала ΔT . В частности, установлено, что зависимость F_{\max} от L прямо пропорциональная, при этом величину ΔL целесообразно принимать в диапазоне $0,1L < \Delta L < 0,5L$, а ΔT — в диапазоне $\Delta T = 10 - 50$ сут.

Критические значения показателя F можно установить экспериментально путем сопоставления с результатами регионального и локального прогноза удароопасности массива апробированными прямыми или геофизическими методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров А. П., Рыжов В. А. К вопросу систематизации геофизических исследований геомеханического состояния массива горных пород и земной поверхности для оперативного контроля безопасного ведения горных работ на угольных шахтах // Уголь. — 2019. — № 10. — С. 29–33.

2. Разумов Е. Е., Простов С. М. Основные принципы построения систем сейсмического мониторинга // Горный журнал. — 2021. — № 1. — С. 8–12.

3. Абдрахманов М. И., Лапин С. Э., Шнайдер И. В. Применение алгоритмов кластеризации для экспресс-анализа сейсмических данных // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 6. — С. 27–44. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-27-44.

4. Журавлев Е. И., Федотов Г. С., Пикель К. С. Автоматизированный прогноз НДС массива горных пород на основе экстраполяции характеристик сейсмической и сейсмоакустической эмиссий с помощью нейросетевых технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 9. — С. 404–410.

5. Zhang M., Liu S., Chen S., Chen Y., Xu G., Qian D. Focus energy determination of mining microseisms using residual seismic wave attenuation in deep coal mining // Hindawi Shock and Vibration. 2018, vol. 2018, pp. 13.

6. Zhebel O., Eisner L. Simultaneous microseismic event localization and source mechanism determination // Geophysics. 2015, vol. 80, no. 1, pp. KS1–KS9.

7. Marcak H., Mutke G. Seismic activation of tectonic stresses by mining // Journal of Seismology. 2013, vol. 17, no. 4, pp. 1139–1148.

8. Chambers D. J. A., Boltz M. S., Richardson J. R., Finley S. A. Application of subspace detection on a surface seismic network monitoring in deep silver mine / Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 141–154.

9. Рассказов И. Ю., Гладырь А. В., Кателла Е. А. Разработка многоуровневой системы комплексного геодинамического мониторинга, удароопасного массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 9. — С. 113–120.

10. Бодин В. В. Влияние локально напряженных зон тектонических нарушений на пространственное распределение спектров сейсмических волн // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 4. — С. 5–10.

11. GITS — система сейсмического мониторинга // Уголь. — 2019. — № 10. — С. 34.
12. Садовский М. А. Блочно-иерархическая модель горной породы и ее использование в задачах сейсмологии / Экспериментальные и численные методы в физике очага землетрясений. — М.: Наука, 1989. — С. 5—13.
13. Сторчеус А. В. О расчете сейсмической энергии землетрясений и взрывов // Вулканология и сейсмология. — 2011. — № 5. — С. 49—59.
14. Джонс М. Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях. — М.: ДМК Пресс, 2004. — 312 с.
15. Елкин Д. И., Тяhti А. С. Метод отжига. — М.: Мир, 2008. — 48 с. **МИАБ**

REFERENCES

1. Egorov A. P., Ryzhov V. A. On the issue of systematization of geophysical studies of the geomechanical state of the rock mass and the earth's surface for operational control of safe mining operations at coal mines. *Ugol'*. 2019, no. 10, pp. 29—33. [In Russ].
2. Razumov E. E., Rukavishnikov G. D., Mulev S. N., Prostov S. M. Basic principles of building a geomonitoring seismic system. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 1, pp. 8—12. [In Russ].
3. Abdrakhmanov M. I., Lapin S. E., Shnyder I. V. Clustering algorithms in express-analysis of seismic data. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 6, pp. 27—44. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-27-44.
4. Zhuravlev E. I., Zhuravlev E. I., Pikel' K.S. Automated forecast the stress state of the rock mass on the basis of extrapolation characteristics of seismic and seismic acoustic emission using a neural network technologies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 9, pp. 404—410. [In Russ].
5. Zhang M., Liu S., Chen S., Chen Y., Xu G., Qian D. Focus energy determination of mining microseisms using residual seismic wave attenuation in deep coal mining. *Hindawi Shock and Vibration*. 2018, vol. 2018, pp. 13.
6. Zhebel O., Eisner L. Simultaneous microseismic event localization and source mechanism determination. *Geophysics*. 2015, vol. 80, no. 1, pp. KS1—KS9.
7. Marcak H., Mutke G. Seismic activation of tectonic stresses by mining. *Journal of Seismology*. 2013, vol. 17, no. 4, pp. 1139—1148.
8. Chambers D. J. A., Boltz M. S., Richardson J. R., Finley S. A. Application of subspace detection on a surface seismic network monitoring in deep silver mine. *Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 141—154.
9. Rasskazov I. Yu., Gladyr A. V., Katella E. A., Miroshnikov V. I. Development of the complex geodynamic multilevel system for burst-hazard rock mass monitoring. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no. 9, pp. 113—120. [In Russ].
10. Bodin V. V. Influence of local and intense zones of tectonic faults on spatial distribution of spectrum of seismic waves. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no. 4, pp. 5—10. [In Russ].
11. GITS — Система сейсмического мониторинга. *Ugol'*. 2019, no. 10, pp. 34. [In Russ].
12. Sadovskiy M. A. Blochno-ierarkhicheskaya model' gornoy porody i ee ispol'zovanie v zadachakh seysmologii. *Ekspperimental'nye i chislennye metody v fizike ochaga zemletryaseniya* [Experimental and numerical methods in earthquake focus physics], Moscow, Nauka, 1989, pp. 5—13.
13. Storcheus A. V. Calculating the seismic energy of earthquakes and explosions. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2011, no. 5, pp. 49—59.
14. Jones M. T. *Programmirovaniye iskusstvennogo intellekta v prilozheniyakh* [All Application Programming Программирование искусственного интеллекта в приложениях], Moscow, DМК Press, 2004, 312 p.
15. Elkin D. I. Tyakhti A. S. *Metod otzhiga* [Annealing method], Moscow, Mir, 2008, 48 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Разумов Егор Евгеньевич^{1,2} – ассистент,
научный сотрудник, e-mail: razumov@vnimi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3696-8553,

*Простов Сергей Михайлович*¹ – д-р техн. наук,
профессор, e-mail: psm.kem@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0780-2690,

*Мулев Сергей Николаевич*² – директор по науке,
e-mail: smuleva@yandex.ru,

*Рукавишников Георгий Дмитриевич*² – заведующий центром
геодинамических наблюдений, e-mail: geodmiruk@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-8228-2870,

¹ Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева,

² АО «Научно-исследовательский институт
горной геомеханики и маркшейдерского дела –
межотраслевой научный центр ВНИМИ».

Для контактов: Разумов Е.Е., e-mail: razumov@vnimi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.E. Razumov^{1,2}, Assistant, Researcher,
e-mail: razumov@vnimi.ru, ORCID ID: 0000-0002-3696-8553,

*S.M. Prostov*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: psm.kem@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0780-2690,

*S.N. Mulev*², Director of Science, e-mail: smuleva@yandex.ru,
*G.D. Rukavishnikov*², Head of Geodynamic

Monitoring Center, e-mail: geodmiruk@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-8228-2870,

¹ T. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
650000, Kemerovo, Russia,

² Research Institute of Mining Geomechanics
& Mine Surveying (VNIMI), 199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: E.E. Razumov, e-mail: razumov@vnimi.ru.

Получена редакцией 09.03.2021; получена после рецензии 18.11.2021; принята к печати 10.01.2022.

Received by the editors 09.03.2021; received after the review 18.11.2021; accepted for printing 10.01.2022.

